

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR



INGENIERÍA INDUSTRIAL ESPECIALIDAD EN ELECTRÓNICA Y AUTOMÁTICA

PROYECTO FIN DE CARRERA

**SISTEMA DE INSTRUMENTACIÓN
PARA TURBINA PICOHIDRÁULICA**

AUTOR: ALEJANDRO BALSEIRO MARTÍNEZ

TUTOR Y DIRECTOR: ERNESTO GARCÍA ARES

Índice general

MEMORIA	10
CAP 1. INTRODUCCIÓN	10
1.1. <i>Introducción</i>	10
1.2. <i>Motivación del proyecto</i>	10
1.3. <i>Objetivos</i>	11
1.4. <i>Alcance.....</i>	11
1.5. <i>Organización del proyecto</i>	12
CAP 2. CONCEPTOS BÁSICOS Y ANTECEDENTES	14
2.1. <i>Concepto de tecnología apropiada</i>	14
2.2. <i>Generación hidroeléctrica</i>	15
2.2.1. <i>Desvío de cauce del agua</i>	15
2.2.2. <i>Interceptación de la corriente de agua</i>	15
2.3. <i>Esquema general de una central de generación hidráulica</i>	15
2.4. <i>Características de una central hidroeléctrica.....</i>	17
2.5. <i>Tipos de generación hidroeléctrica</i>	17
2.5.1. <i>Clasificación de centrales por potencia</i>	17
2.6. <i>Concepto de generación picohidráulica</i>	18
2.7. <i>Estado del arte</i>	18
2.7.1. <i>Captación de datos utilizada</i>	19
CAP 3. ESTRUCTURA DEL SISTEMA Y DE LOS COMPONENTES	20
3.1. <i>Esquema general del sistema</i>	20
3.2. <i>Microcontrolador</i>	21
3.3. <i>Interfaz de configuración</i>	22
3.4. <i>Medición de energía mecánica</i>	24
3.5. <i>Medición de potencia eléctrica</i>	24
3.5.1. <i>Tensión.....</i>	24
3.5.2. <i>Corriente</i>	25
3.6. <i>Salida de las mediciones</i>	25
CAP 4. DISEÑO DEL HARDWARE	26
4.1. <i>Esquemático del sistema.....</i>	26
4.2. <i>Placas implementadas</i>	26
4.2.1. <i>Placas independientes</i>	27
4.2.2. <i>Placas acopladas a la placa Arduino Mega.....</i>	28
4.3. <i>Sistema de Control y Almacenamiento</i>	29
4.3.1. <i>Interfaz de configuración</i>	29
4.3.1. I. <i>Botonera</i>	29
4.3.1. II. <i>Pantalla LCD</i>	30
4.3.2. <i>Chip RTC.....</i>	30
4.4. <i>Tarjeta SD</i>	31
4.5. <i>Medición de energía mecánica</i>	32
4.5.1. <i>Sensores de presión</i>	32



4.5.2. Sensor de caudal (Caudalímetro).....	38
4.6. Medición energía eléctrica.....	40
4.6.1. Sensor de corriente.....	40
4.6.2. Sensor de tensión	43
4.6.3. Control de carga variable.....	43
CAP 5. DISEÑO DEL SOFTWARE.....	45
5.1. Bloques de funciones principales	45
5.1.1. Bloque de captación de botones	45
5.1.2. Bloque de menú.....	46
5.1.3. Bloque presentación de datos	46
5.1.4. Bloque gestión de tiempo	46
5.1.5. Bloque guardado de datos.....	47
5.1.6. Bloque de lectura de entradas analógicas	47
5.2. Bloque de programa	47
5.3. Ampliaciones del SW.....	48
5.3.1. Bloque de asimilación de datos	49
5.3.2. Bloque de ordenación.....	49
5.3.3. Bloque de media	50
CAP 6. PROCESO EXPERIMENTAL.....	51
6.1. Calibración de Sensores Individuales	51
6.1.1. Sensores de presión.....	52
6.1.2. Sensor de corriente y tensión	56
6.2. Prueba sistema completo.....	57
6.3. Análisis de resultados.....	64
6.4. Segunda prueba del sistema	65
CAP 7. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO	67
7.1. Conclusiones	67
7.2. Trabajo futuro.....	67
CAP 8. REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA.....	69
8.1. Bibliografía.....	69
ANEXOS.....	70
CAP 1. MANUAL DE MANEJO DEL SISTEMA DE PRUEBA.....	70
1.1. Descripción del sistema de botonera	70
1.2. Configuración de las pruebas.....	71
1.3. Comienzo y finalización de las pruebas.....	71
1.3.1. Continuación proceso de prueba detenido	72
1.3.2. Comienzo de nueva prueba	72
1.4. Lectura de los datos guardados	72
PLIEGO DE CONDICIONES	75
PRESUPUESTO	76

Índice de figuras

Figura 1: Flujo de diseño	12
Figura 2: Central de generación hidráulica	16
Figura 3: Circuito captador de datos con EL-USB-3.....	19
Figura 4: Diagrama de bloques del sistema	21
Figura 5: Botón menú.....	22
Figura 6: Botonera de navegación	23
Figura 7: Botón de aceptación/cancelación	23
Figura 8: Display LCD	24
Figura 9: Diagrama de bloques del sistema	26
Figura 10: Placa de carga variable.....	28
Figura 11: Diseño electrónico de botonera	30
Figura 12: Configuración electrónica RTC	31
Figura 13: Circuito de tarjeta SD	31
Figura 14: Configuración en puente completo sensores 24PC.....	32
Figura 15: Circuito de compensación de la deriva térmica	33
Figura 16: Esquema compensación temperatura serie 24PC.....	33
Figura 17: Cálculo salida en peor caso posible	36
Figura 18: Circuito de acondicionamiento de señal diferencial	37
Figura 19 : Circuito de acondicionamiento del caudalímetro	38
Figura 20: Alimentación de caudalímetro	40
Figura 21: Diagrama de bloques de medición de la energía eléctrica.....	40
Figura 22: Escala de tensión - corriente ACS714	41
Figura 23: Sensor de corriente	43
Figura 24: Sensor de tensión	43
Figura 25: Circuito control PWM.....	44
Figura 26: Código de caso límite de codificación	46
Figura 27: Flujograma programa general.....	48
Figura 28: Matriz almacenamiento de datos (ejemplo dos sensores, n muestras).....	49
Figura 29: Bomba de presión manual calibrada.....	52
Figura 30: Foto sensor de presión 250 PSI	53
Figura 31: Curva de calibración sensor de presión 250PSI.....	55
Figura 32: Detalle sensor caudal con resistencia	58
Figura 33: Montaje experimental.....	59
Figura 34: Detalle de LCD + Botonera + Bomba de presión	59
Figura 35: Detalle placa de carga variable con conexionado + LCD	60
Figura 36: Representación datos tensión y corriente	62
Figura 37: Evolución de la presión y el caudal en prueba	62
Figura 38: Gráfico evolución de energías	64
Figura 39: Evolución de la tensión y la corriente (2º Proceso experimental)	65



Figura 40: Evolución de la presión y el caudal (2º proceso experimental).....	66
Figura 41: Estudio de energías (2º proceso experimental)	66
Figura 42: Propuesta de mejora	68

Índice de ecuaciones

Ecuación 1: Tensión en la entrada positiva del amplificador operacional	33
Ecuación 2: Cálculo de resistencia R3	34
Ecuación 3: Cálculo de resistencia R2	34
Ecuación 4: Cálculo de la corriente de polarización del sensor	34
Ecuación 5: Función de transferencia AD627.....	35
Ecuación 6: Cálculo de ganancia y valor de resistencia R5.....	35
Ecuación 7: Función de tensión de salida sensor	35
Ecuación 8: Comprobación puntos teóricos de ajuste	36
Ecuación 9: Recta de ajuste de los sensores de presión	38
Ecuación 10: Ecuación general caudalímetro.....	38
Ecuación 11: Ecuación genérica tensión de salida del caudalímetro	39
Ecuación 12: Cálculo de la etapa de ganancia.....	39
Ecuación 13: Ecuaciones características tensión de salida en función de Is y Q.....	39
Ecuación 14: Comprobación de niveles.....	39
Ecuación 15: Función de comportamiento sensor de caudal	39
Ecuación 16: Cálculo de función de transferencia del sensor de corriente	41
Ecuación 17: Cálculo de la función de transferencia del amplificador AD8667	42
Ecuación 18: Función de transferencia del sistema	42
Ecuación 19: Transformación codificada de tiempo	46
Ecuación 20: Transformación lecturas analógicas	47
Ecuación 21: Cálculo de error de histéresis en fondo de escala	55
Ecuación 22: Función calculada para el sensor de presión de 250PSI	56
Ecuación 23: Función ajustada sensor 250PSI.....	56
Ecuación 24: Funciones calibradas de tensión y corriente en carga	57
Ecuación 25: Cálculo resistencia prueba	58
Ecuación 26: Cálculo de energía en carga variable	63
Ecuación 27: Balance de energía del sistema.....	64
Ecuación 28: Ecuación de transformación mejorada	68



Índice de tablas

Tabla 1: Datos calibración sensor de presión a 250PSI	54
Tabla 2: Datos prueba sin tratar.....	61
Tabla 3: Cálculos sobre los datos de prueba	63

Agradecimientos

Lo primero es agradecer a mis padres, Francisco Balseiro e Isabel Martínez, el esfuerzo realizado para que yo pudiese estudiar la carrera que años antes de entrar en la universidad decidí estudiar. Por ese motivo gracias de todo corazón. Agradecer de nuevo a mis padres la paciencia a lo largo de estos años de exámenes frustrados, horarios imposibles y demás situaciones complicadas y en ocasiones inabarcables que por circunstancias de la carrera, personales y de mi propio carácter han tenido que sufrir, tolerar y aprender a manejar con la máxima de las paciencias y la mejor de las actitudes que un hijo pudiese desear. Por ese motivo y otros muchos más, vuelvo a daros las gracias.

Agradecer también a mi director de proyecto, Ernesto García, su paciencia y su dedicación en este proyecto. Me siento afortunado de contar con él como tutor y director del mismo por sus inmensos conocimientos y capacidad de enseñanza, que me han llevado a considerarle uno de los mejores docentes que he conocido en mi vida académica.

En esta sección no puedo obviar a mis amigos y compañeros, los cuales me han acompañado durante todos estos años y con los cuales he compartido horas de estudio, horas de biblioteca y un número en absoluto despreciable de buenos momentos y risas. Gracias a todos.

Por último, y no por ello menos importante, agradezco a la universidad las enseñanzas dadas, no sólo a nivel y calidad de conocimientos, sino a las enseñanzas generales para la vida, siendo la más importante de ellas que mediante el duro trabajo se puede suplir la falta de talento y las carencias, y que al final, el esfuerzo del trabajo duro acaba siendo recompensando.



Página en blanco

Memoria

CAP 1. Introducción

1.1. Introducción

Este documento recoge el estudio de viabilidad y el desarrollo de Hardware (HW) y Software (SW) de un sistema de captación de datos sobre una estación de generación picohidráulica, teniendo en cuenta las necesidades de implantación de la estación. Entre las mismas cabe destacar que el sistema está concebido para su uso, implantación, mantenimiento (e incluso montaje de unidades adicionales), en países en vías de desarrollo, en los que resulta complicado el acceso a componentes y utillaje sofisticados.

A lo largo del mismo, se estudiarán las elecciones tomadas, con el fin de justificar las decisiones de diseño, el desarrollo y posterior implantación de dicho sistema de captación, teniendo en cuenta las diferentes opciones a escoger y siempre teniendo en cuenta las siguientes dos características, referentes a las condiciones habituales en un país con escasez de recursos:

- **Fácil acceso a los elementos individuales:** Los componentes comerciales deben ser fáciles de conseguir, facilitando la labor de aquellos que deban implantarlo en la pico central de generación.
- **Bajo precio:** Debido a la escasez de recursos, es necesario que el precio de los componentes sea lo más reducido posible, con el fin de que la compra de los componentes, o los repuestos en caso de que sean necesarios, no implique un esfuerzo excesivo por los gestores de la planta.

Durante el desarrollo de éste documento, se introducirán los diferentes bloques escogidos, así como un estudio evolutivo de los mismos hasta el diseño final, con el fin de que quede reflejada la opción final como la mejor opción en base a las implementaciones previas, así como a los datos recogidos.

1.2. Motivación del proyecto

La motivación principal de éste proyecto es el de complementar un sistema hidráulico de generación de electricidad para regiones en desarrollo. Dichos sistemas, de baja potencia, se utilizan principalmente en regiones con escasez de recursos para dotarles de unos mínimos de confort y sistemas de apoyo, tales como una nevera de campaña, la posibilidad de cargar un teléfono móvil, o algún sistema de iluminación complementaria.



Dichos sistemas, por su naturaleza, se suelen construir con materiales reciclados o de desguace, ya que es difícil acceder a componentes de primera mano y de calidad en estas regiones, además de reducir su coste de fabricación. Dichos materiales pueden ser desde restos de canalizaciones antiguas, maderas de la zona, a piezas de coche o motocicleta extraídos de un desguace.

A nivel personal, la aportación que me produce este proyecto es la satisfacción de colaborar en un proceso de mejora de regiones en condiciones verdaderamente pobres, haciendo que en las mismas se den unas condiciones de vida ligera, pero significativamente mejores, a las que había antes de instaurar dicho sistema. La intención de mi proyecto es poder medir la generación de la turbina, permitiéndonos optimizarla para la región concreta en la que se instale y mejorar el servicio, de modo que la energía que se reciba sea de mayor calidad cada vez.

1.3. Objetivos

El proyecto que aquí tratamos tiene por objetivo el desarrollo de un sistema de instrumentación para centrales picohidráulicas, capaz de medir y almacenar para su uso posterior, las magnitudes que permiten conocer la potencia mecánica disponible a la entrada de la central (procedente del salto de agua) y la potencia eléctrica disponible a la salida de la misma (la que se entregaría a la carga). El diseño deberá cumplir además los siguientes requisitos:

- Mejora del sistema anteriormente utilizado para la captación de datos.
- Diseño de un sistema de fácil implementación en regiones con escasez de recursos.
- Realización de un diseño modular, de forma que cada bloque sea reutilizable independientemente del resto y que la modificación de un bloque no implique rehacer el sistema completo.
- Minimizar el coste de fabricación del sistema, así como maximizar la facilidad del acceso a los materiales de fabricación del mismo.

1.4. Alcance

Tras comentar los objetivos globales de este proyecto, a continuación se exponen los diseños a realizar para lograr el cumplimiento de esos objetivos:

- Diseño y construcción del subsistema de acondicionamiento y captación de datos para los sensores de la parte mecánica de la central, ya definidos en un trabajo anterior.
- Diseño y construcción del subsistema de medida de la potencia eléctrica de salida, incluyendo la elección de los sensores y el acondicionamiento de la señal de los mismos, para su correcta captación e interpretación.
- Diseño de una carga electrónica activa controlable por el SW que gestiona el sistema.
- Diseño de un algoritmo sencillo de control y captación de datos, flexible y adaptable para el usuario receptor e implementado utilizando SW libre sobre una plataforma HW de bajo coste y fácil acopio.

- Diseño de PCB específicas y de fácil implementación con un nivel limitado de recursos

1.5. Organización del proyecto

El diseño del proyecto se ha organizado siguiendo un esquema clásico de diseño electrónico:

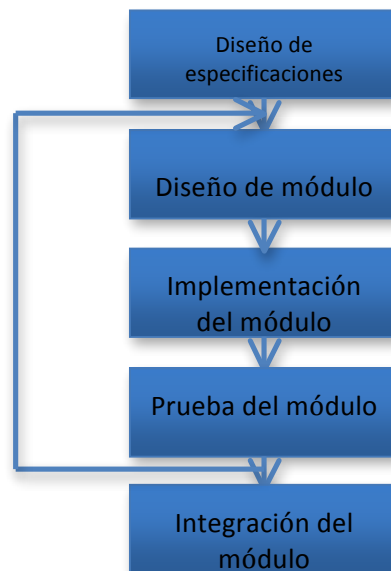


Figura 1: Flujo de diseño

Durante el desarrollo del proyecto, se volvió a la fase de diseño, tanto de software como de hardware en múltiples ocasiones buscando la solución funcional más óptima y efectiva, de acuerdo a los objetivos antes expuestos.

En cuanto a la organización de la presente memoria, ésta se ha dividido en los siguientes capítulos:

Conceptos básicos y antecedentes: En éste capítulo se explicarán los conceptos básicos de tecnología apropiada, así como los de la energía hidráulica, prestando especial atención a los sistemas de generación pichidráulica. También se hará un estudio de la tecnología utilizada previamente en trabajos anteriores.

Estructura del sistema y de los componentes: A lo largo de éste capítulo se presentará la estructura seguida para el desarrollo del sistema sensor, así como la presentación de los elementos básicos y necesarios escogidos, justificando su elección.

Diseño del Hardware: Durante éste capítulo se entrará en el detalle del sistema de instrumentación diseñado, justificando la elección de componentes y mostrando las ecuaciones necesarias para caracterizar el sistema.

Diseño del Software: Se explicará la estructura del código realizada, así como la



justificación de la estructura, presentando los flujogramas de los módulos principales.

Proceso experimental: Se presentará el proceso experimental seguido, tanto para la caracterización individual de los sensores cómo para la caracterización del sistema completo.

Conclusiones: Se analizarán los datos extraídos y se expondrán las futuras implementaciones para la mejora del sistema de instrumentación

Referencias y Bibliografía

CAP 2. Conceptos básicos y antecedentes

2.1. Concepto de tecnología apropiada

La definición literal de la tecnología apropiada se extrae de la definición de **tecnología**, la cual tiene la finalidad de ayudarnos a resolver problemas y **apropiada**, lo que implica que está diseñada para una necesidad concreta.

Las tecnologías apropiadas reconocen la diversidad de culturas o comunidades por eso estas tecnologías son desarrolladas desde las comunidades y no desde un laboratorio centralizado, ya que cada una de éstas tiene unas necesidades diferentes y unas posibilidades distintas como el ecosistema, los pueblos, sus historias...

Este tipo de tecnologías tienen en común que se desarrollan para crear salud, empleo, autosuficiencia local, mejorar la educación, etc.

Una vez dada una breve definición, vamos a describir las características generales de este campo:

1. **Pequeña Escala:** son tecnologías de dimensión menor a las alternativas comerciales, de manera que puede ser operadas, mantenidas y gestionadas a nivel local.
2. **Simplicidad:** es decir, que puedan ser utilizadas por personas sin un gran nivel educativo o de cualificación, lo que implica que, en lo posible, su mantenimiento y reparación puedan ser hechos por los mismos usuarios.
3. **Modularidad:** posibilidad de descomponer las partes del proyecto ya que si tuviésemos algún problema sería más sencillo quitar el módulo estropeado y arreglarlo. También sería importante que sea modular para poder transportarlo mejor en el caso que tengamos que situarlo en una zona de difícil acceso.
4. **Material:** debe ser al máximo posible propio de la zona donde queremos hacer la instalación o lo más fácil de encontrar por la zona; también intentaremos que los materiales empleados sean reciclables o procedentes de reciclaje.
5. **Energía renovable:** se utilizan fuentes como serían energía solar, energía animal, pequeñas caídas de agua, viento, etc.
6. **Baja inversión de capital:** como el fundamento principal es intentar conseguir energía de la forma más eficiente y menos costosa, ya que estas instalaciones suelen ser en países tercermundistas o en vías de desarrollo, el coste de implantación debe ser bajo.
7. **Involucrar a la población:** conseguir que los habitantes de esta zona tengan la posibilidad de aprender el funcionamiento de las máquinas para que en un futuro no tengan problemas en su manejo, mantenimiento e incluso fabricación.

La situación de estos proyectos se suelen localizar en zonas de Centroamérica, particularmente en zonas de difícil acceso como suele ser la selva o zonas boscosas cercanas a la región.



2.2. Generación hidroeléctrica

La generación hidroeléctrica se basa en el aprovechamiento de energía hidráulica de un río, para generar energía eléctrica. Las centrales de generación hidroeléctrica son una evolución de los antiguos molinos de agua.

El funcionamiento se basa normalmente en la utilización de un salto de agua, haciendo pasar el caudal de agua que cae del nivel superior al inferior por una turbina hidráulica la cual transmite la energía mecánica a un generador, que la transforma en energía eléctrica.

Además del salto del agua, existen otros métodos para el aprovechamiento de la energía hidráulica, dos de los más comunes son los denominados por **desvío de cauce del agua** e **interceptación de la corriente de agua**.

2.2.1. Desvío de cauce del agua

El principio de ésta forma de aprovechamiento hidráulico de los ríos se basa en el hecho de que la velocidad del flujo de éstos es aproximadamente constante a lo largo de su cauce, el cual siempre va de cotas superiores a menores. Lo que se hace es, mediante la creación de un desvío artificial de caudal o aprovechando el transcurso natural del agua, integrar una turbina sobre dicho flujo, que incluya todo el sistema de generación eléctrica. Éste método se utiliza sobre ríos que mantengan en movimiento una masa aproximadamente constante de agua durante todo el año.

2.2.2. Interceptación de la corriente de agua

Éste método se basa en la construcción de una represa o embalse de agua que retenga el cauce. El dique establece un salto de agua artificial aprovechable para la extracción de energía mediante una estación de generación hidráulica (*Ver: Esquema general de una central de generación hidráulica, pág. 15*).

2.3. Esquema general de una central de generación hidráulica

A continuación se detallará punto a punto el proceso de transformación de energía, para ello nos vamos a basar en esta figura de la instalación de una central de generación hidráulica basada en un sistema de interceptación de la corriente de agua:

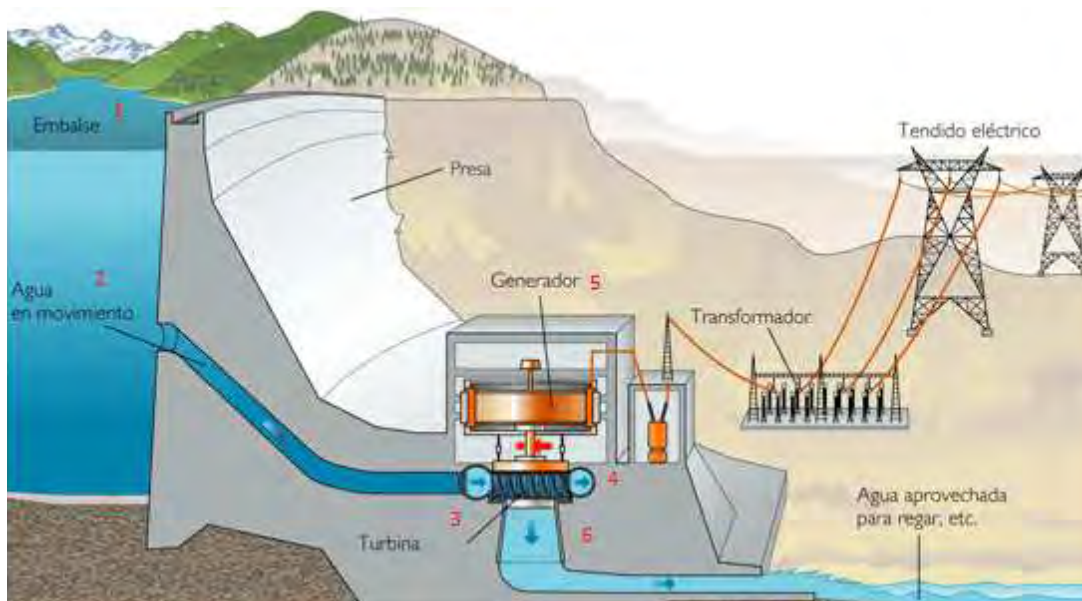


Figura 2: Central de generación hidráulica

Punto 1.- Nivel del embalse

Este es el punto más alto de la instalación se crea para detener el cauce de un río mediante una presa de hormigón.

Punto 2.- Toma de agua

El punto de toma de agua es el lugar por donde va a entrar el agua embalsada a nuestra estructura, se sitúa en un punto intermedio de la presa y en la entrada tiene una rejilla para evitar impurezas.

Punto 3.- Inyector

Una vez que el agua ha seguido el paso por los conductos llega a la sala de máquinas, que está a nivel del desagüe del río. En este punto el agua llega al inyector, que dirige el chorro de agua hacia los álabes de la turbina y aumenta su velocidad al disminuir la sección de salida.

Punto 4.- La turbina

En este momento ya nos encontramos con la parte principal del sistema, esta máquina recibe desde el inyector un chorro de agua a alta velocidad que golpea los álabes, haciendo girar el eje de la turbina, que a su vez accionará el alternador para generar energía eléctrica.

Punto 5.- El alternador

El alternador es la máquina mecánico-eléctrica encargada de la transformación de la energía cinética de la turbina en energía eléctrica. El alternador cuenta con un rotor y un estator, que dependiendo de los niveles de energía a transformar tendrán un tipo de estructura u otro. En el caso de nuestra central pichidráulica la corriente generada por el alternador es



posteriormente rectificada mediante un circuito electrónico acoplado al mismo.

Punto 6.- Salida de desagüe

Una vez que se ha producido todo el proceso anteriormente descrito el agua, mediante una tubería, vuelve al cauce natural del río.

2.4. Características de una central hidroeléctrica

Las dos características principales de una central hidroeléctrica, desde el punto de vista de su capacidad de generación son:

- La **potencia**, que se calcula en función del desnivel existente entre el nivel medio del embalse, del nivel medio de las aguas debajo de la central, y del caudal máximo aprovechable. Además, la potencia eléctrica entregada dependerá de las características de las turbinas y de los generadores utilizados en la transformación.
- La **energía garantizada** en un periodo de tiempo determinado, típicamente un año, que se calcula en función del volumen útil del embalse y de la potencia instalada.

2.5. Tipos de generación hidroeléctrica

Para una clasificación de centrales se va a tener en cuenta en primer lugar la estructura física del río y las necesidades de generar potencia. Con estas dos características se clasificará la estructura física de la central.

2.5.1. Clasificación de centrales por potencia

La clasificación se realizará en base a las potencias máximas que las centrales pueden generar:

- **Pico-centrales:** Generación de potencias de hasta 5 kW, son las ideales para zonas aisladas, la obra civil es mínima y suele usarse para comunidades cercanas.
- **Micro-centrales:** Generan potencias de entre 5 kW hasta 50 kW, son las de tamaño óptimas para grupos de entre 30 o 100 familias.
- **Mini-centrales:** Sus potencias van entre 50 kW hasta 500 kW, para grupos de 50 a 300 familias.
- **Pequeñas centrales:** Potencias de 500 kW hasta 5000 kW, capaces de sostener una pequeña población, e incluso, una pequeña carga industrial.
- **Macro centrales:** Generaciones por encima de 5000 kW, son para altas demandas e incluyen una gran inversión en obra civil.

La turbina en la cual se implantará el sistema de sensorización se encuadra dentro de la clasificación de pico-turbina, ya que no se espera que la potencia generada alcance más de más de 1kW.

2.6. Concepto de generación picohidráulica

La energía picohidráulica se basa en la generación de energía eléctrica o mecánica mediante un curso fluvial con una diferencia de altura, siendo la potencia generada menor que 5kW.

Esta energía es muy sencilla de obtener en cuanto a su montaje. El coste de instalación de una central como ésta es bajo, ya que todos los materiales que se usan pueden ser reciclados o elaborados sin la necesidad de maquinaria específica.

En consecuencia, dada su facilidad de construcción y bajo coste, está siendo una tecnología muy usada en partes del mundo inaccesibles, en las cuales el tendido eléctrico sería muy costoso o en zonas pobres del mundo, donde éste es inexistente o de cobertura muy limitada.

Otro punto positivo de esta fuente de energía es su constancia es decir, la energía se va a estar produciendo siempre que el flujo de agua sea permanente. En caso contrario, en algunas instalaciones, se hace un depósito de piedras para reducir la sección del río y ayudar a cumplir el caudal nominal. Además no necesita de un aporte de ningún combustible adicional para generar energía.

Las utilidades de la energía pico hidráulica son variadas ya que podemos sacar tanto potencia eléctrica como potencia mecánica.

La **potencia mecánica** sale directamente del eje de la turbina, permitiendo el funcionamiento de máquinas como talleres, molinos... al poner una correa solidaria al movimiento del eje.

La **energía eléctrica** se puede sacar en corriente alterna (CA) con el funcionamiento de un alternador, o baterías de corriente continua (CC) si ha dicho alternador se le acopla un transformador con rectificador. Para poder producir potencia en las instalaciones picohidráulicas necesitaremos un caudal pequeño natural o creando un salto de agua artificial cómo los que se han visto anteriormente.

2.7. Estado del arte

La turbina picohidráulica sobre la que se acoplará el sistema de instrumentación diseñado hará uso de un alternador de coche como generador, así como una batería de coche para el almacenamiento temporal de la energía generada. La batería se utilizará también como refuerzo a la energía solicitada por el sistema, en el caso de que la picoturbina no fuese capaz de generar tanta energía como le solicite el sistema. El motivo de la elección de elementos de coche, es la posibilidad de encontrarlos en un desguace, y en el caso de avería o rotura, pueden ser fácilmente sustituibles.

En lo referente a éste proyecto de turbina picohidráulica, en proyectos anteriores la instrumentación requerida para las mediciones no se integró con el sistema, por lo que el tratamiento y caracterización de las señales todavía no se encontraba implementado. La medición de los sensores se hacía de forma puntual.



Cómo sistema de captador de datos de tensión y corriente para el cálculo de potencia se contaba con un sistema USB, capaz de captar y almacenar datos durante una cantidad limitada de tiempo. A continuación se detallará el funcionamiento del sistema y el acondicionamiento implementado en proyectos anteriores.

2.7.1. Captación de datos utilizada

La captación de datos se realizaba mediante un dispositivo llamado “EL-USB-3”, de la casa “Lascar Electronics”. Dicho sistema de captación de datos es capaz de captar valores de tensión entre 0 VDC y 30 VDC. Para la captación de corriente, se utilizó un sensor de efecto hall con capacidad de aislamiento entre dos fases del circuito, de manera que se tiene un circuito primario de alta corriente, y un secundario de baja. Para la transformación de la corriente a la salida del sensor, se utiliza una resistencia, sobre la que se medía en paralelo una tensión proporcional a la corriente entregada a la carga.

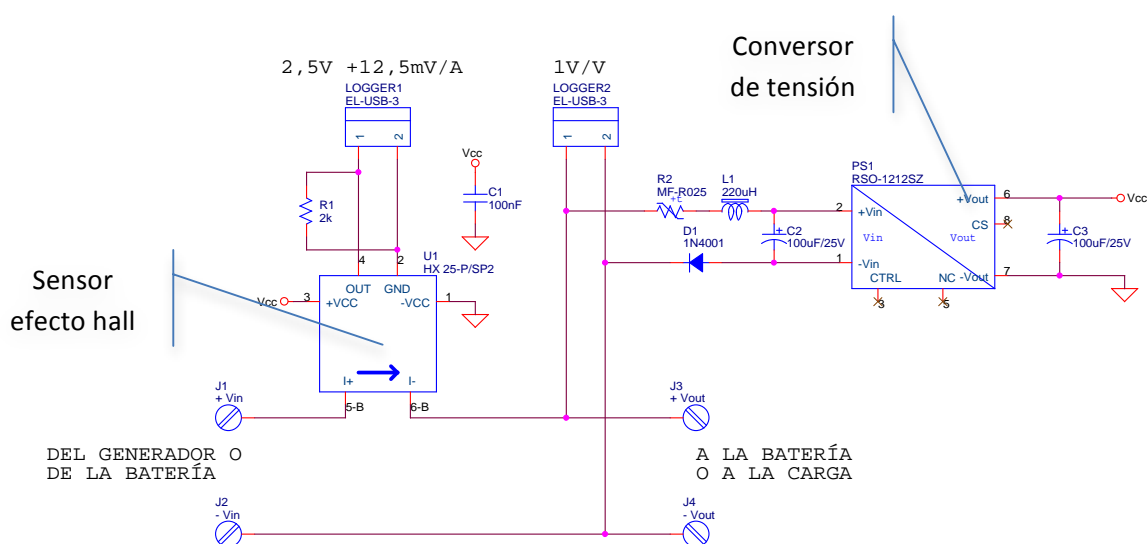


Figura 3: Circuito captador de datos con EL-USB-3

Adicionalmente, el sistema contaba con un convertor de tensión DC a DC, con el fin de generar una alimentación estable para el sensor de corriente.

CAP 3. Estructura del sistema y de los componentes

A continuación se detallará cual es el estudio previo realizado, con el fin de poder hacer un correcto diseño e implantación del sistema de medida y captación de datos. Antes de exponer el esquema general del diseño de instrumentación realizado, se explicará la filosofía seguida para implementarlo.

3.1. Esquema general del sistema

El sistema se divide básicamente en tres bloques constitutivos:

1. **El bloque de instrumentación:** Dedicado a la captación de las señales y medidas básicas para la caracterización de la central picohidráulica, las cuales nos permiten adicionalmente asegurar que el funcionamiento de la misma es el correcto.
2. **El bloque usuario:** El cual permite al usuario configurar las pruebas, así como extraer los datos para su posterior análisis.
3. **El bloque central:** los dos bloques anteriores se encuentran comunicados por un bloque centralizado por un microcontrolador, el cual es encargará de captar las señales que nos trasmite el bloque sensor, y en base a la configuración realizada por el usuario, procesar y almacenar los datos requeridos.

Dichos bloques se encuentran a su vez subdivididos en diferentes sub-bloques. Para una mejor comprensión de los mismos a continuación se detalla un diagrama esquemático, con el fin de entender cada una de las partes constitutivas del sistema y sus diferentes sub-bloques referenciados al bloque central (bloque de instrumentación en el eje vertical, bloque usuario en el horizontal).



Figura 4: Diagrama de bloques del sistema

A continuación se irán detallando en los sucesivos capítulos los diferentes bloques, así como sus diseños e implementaciones sucesivas.

3.2. Microcontrolador

El sistema está centralizado a través de un microcontrolador, que será el encargado de procesar las señales captadas por los sensores, y generar la información necesaria para el procesamiento de los datos obtenidos posteriormente.

Las señales de entrada y salida no son rápidas (su actualización es cercana o incluso inferior a un Hertzio), por lo que no es necesaria una gran velocidad de computación de cálculo y captación. El número de entradas y salidas es bastante limitado, por lo que no necesitamos un microcontrolador que contenga una gran cantidad de las mismas.

El sistema escogido para realizar dicha función es la plataforma de Hardware (HW) y Software (SW) libre Arduino.

Las plataformas de HW libre se basan en el principio de permitir al usuario realizar modificaciones sobre la placa, al estar disponible de forma editable los planos del diseño original, existiendo además múltiples portales donde los usuarios de todo el mundo cuelgan las modificaciones que realizan sobre el mismo.

Existen diversas plataformas de HW libre (Parallax Basic Stamp, BX24de Netmedia, Phidgets, Handyboard del MIT,...) con funcionalidades similares, la elección de la plataforma Arduino responde a los siguientes motivos:

- **Asequible:** Las placas Arduino son más asequibles comparadas con otras plataformas de microcontroladores. La versión más cara de un módulo de Arduino puede ser montada a mano, e incluso ya montada tiene un coste inferior a los 60€
- **MultiPlataforma:** El software de Arduino funciona en los sistemas operativos Windows, Macintosh OSX y Linux. La mayoría de los entornos para microcontroladores están limitados a Windows.
- **Entorno de programación simple y directo:** El entorno de programación de Arduino es fácil de usar para principiantes y lo suficientemente flexible para los usuarios avanzados, si bien puede carecer de ciertas utilidades de depuración.
- **Software ampliable y de código abierto:** El software Arduino está publicado bajo una licencia libre y preparado para ser ampliado por programadores experimentados, por lo que cualquier usuario puede modificar librerías, e inclusive el propio código del programa de captación, adaptándolo a las necesidades que se tengan.

Se ha escogido la placa denominada como Arduino Mega, debido al número de entradas analógicas y digitales necesarias en nuestro sistema.

3.3. Interfaz de configuración

La interfaz de configuración hace referencia al sistema de comunicación del usuario con el microcontrolador, permitiéndole gestionar las pruebas que va a realizar, o la monitorización del sistema en tiempo real.

Para ello, se contará con una pantalla LCD y un sistema de cinco botones para la navegación entre menús.

Los botones escogidos deben ser de sencilla interpretación, y fáciles de conseguir, ya que será piezas que pueden tener tendencia a estropearse. Se presentan las siguientes alternativas:

- Cómo botón de menú (Configuración de pruebas) se ha escogido un botón sencillo, de un color llamativo:



Figura 5: Botón menú



- Cómo flechas de navegación, un botón extraído de un sistema de elevalunas eléctrico de un coche, sencillo de conseguir, y fáciles de instalar.



Figura 6: Botonera de navegación

- Finalmente, como botones de aceptación/cancelación, o inicio/finalización de la prueba, un botón doble con una clara distinción de colores y disposición:



Figura 7: Botón de aceptación/cancelación

La botonera de configuración se basará en éstos botones sin leyenda, facilitando que sea una interfaz universal y haciendo que el manejo sea simple y directo en el caso de exista una clara diferencia entre el sistema de escritura local con el sistema de caracteres latinos.

Además, los botones escogidos, u otros con idéntica funcionalidad, pueden obtenerse fácilmente del desguace de coches o equipos eléctricos industriales en desuso.

La pantalla LCD contará con la opción de mostrar la información instantánea que se está midiendo por defecto, y facilitará al usuario la navegación entre las diferentes opciones de configuración de la placa (configuración de la frecuencia de medición).



Figura 8: Display LCD

3.4. Medición de energía mecánica

El sistema de captación de energía mecánica se ha escogido en base a un estudio anterior quedando por parte del autor del presente proyecto el acondicionamiento de las señales de salida de los mismos y la captación de las mismas por el sistema de microcontrolador.

El sistema contará con un caudalímetro y dos sensores de presión; los sensores elegidos para estas mediciones son:

- Un sensor piezoresistivo de sonda de 250 psi a fondo de escala.
- Un sensor piezoresistivo diferencial de 100 psi a fondo de escala.
- Un transductor de caudal de 100l/minuto a fondo de escala y con salida 4-20 mA.

3.5. Medición de potencia eléctrica

El sistema de medición de la potencia eléctrica se realizará midiendo la tensión y la corriente que circulan sobre una carga variable sencilla. A continuación se detallan de forma individuales los sistemas utilizados para éste tipo de sistemas:

3.5.1. Tensión

El sistema de medición de la tensión de salida será la propia placa de Arduino, que tiene capacidad de captar señales analógicas de hasta 5V, por lo que será necesario reducir la tensión procedente del generador para obtener la máxima resolución en cada prueba realizada.



3.5.2. Corriente

Se ha optado por un sensor de efecto Hall, que da una tensión proporcional a la corriente de entrada. El modelo escogido es el ACS714, por su fácil manejo, su bajo precio y su alta compatibilidad con las placas Arduino.

Para gestionar la carga variable, se evaluarán a nivel experimental las siguientes opciones:

- **Poner una carga activa PWM:** Una rama que contenga una resistencia de potencia y uno o varios Mosfet que se encarguen de regular la corriente que se entrega a la resistencia de potencia.
- **Utilizar varias resistencias y un banco de relés para conectarlas:** Podrían utilizarse relés extraídos de un coche, por el rango de tensiones y corrientes. En éste caso sería interesante utilizar también componentes de coche para hacer de resistencias, ya que si no el precio se encarecería en exceso, debido al alto coste de éste tipo de componentes.

Por sencillez de implementación se ha optado por utilizar una carga activa PWM, situando una rama con varios transistores mosfet puestos en paralelo para reducir la energía disipada en forma de calor, disparados por un único driver PWM controlado desde el sistema microcontrolador.

3.6. Salida de las mediciones

La salida de las mediciones realizadas se hará en dos formatos diferentes:

- **LCD:** En el LCD se mostrará un resumen de los datos de la potencia instantánea en cada momento, así como la hora local y otros datos de interés
- **Memoria extraíble:** En la memoria extraíble se contará con la información detallada captada por los sensores y grabada cada cierto periodo de tiempo. Dicha información saldrá de forma que pueda ser fácilmente manipulable por el usuario y adecuada para el post-procesado de los datos, guardándose adicionalmente los datos de fecha y hora en los que se almacenaron dichas medidas.

CAP 4. Diseño del Hardware

4.1. Esquemático del sistema

El diseño del sistema completo se muestra, a nivel modular, en la Figura 9.

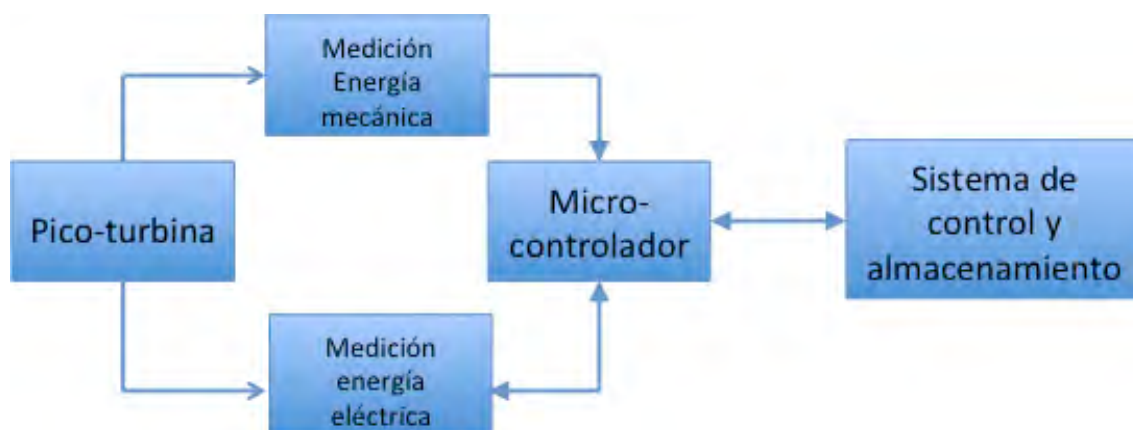


Figura 9: Diagrama de bloques del sistema

A continuación se detallarán los diferentes bloques de acondicionamiento y control diseñados para el sistema electrónico, entrando sobre cada uno de los bloques indicados en la Figura 4.

4.2. Placas implementadas

En el diseño para fabricación, se ha optado por implementar un sistema modular, separado en dos bloques diferenciados. El primer bloque es aquel que está conformado por placas individuales y el segundo conforma las placas acopladas al sistema de micro-controlador. El primero es independiente del micro-controlador, ya que son aquellas que contienen los acondicionamientos de señal de los sensores; el segundo está diseñado específicamente para la placa Arduino Mega, y en el caso de cambiar el modelo del microcontrolador, habría que modificar también el diseño de dichas placas, adecuando los componentes y huellas para encajarlas en el nuevo modelo.

Gracias a esta modularidad, se obtienen importantes ventajas en coste y flexibilidad de uso, factores clave dado el destino final del diseño:

- Reducción en los costes de implantación, ya que para cada unidad sólo es necesario fabricar y montar las placas necesarias (por ejemplo, si sólo se quiere medir la energía mecánica, no es necesario el circuito de carga electrónica y medida de tensión y corriente).
- Facilidad y reducción en los costes de modificación, ya que en caso de querer cambiar



algún elemento del sistema, sólo es necesario cambiar el circuito asociado a él (por ejemplo, si se quiere cambiar el modelo de caudalímetro sólo sería necesario cambiar la placa de su circuito de acondicionamiento).

- Posibilidad de reutilización de los bloques desarrollados en otros proyectos. Por ejemplo, el sistema de control y el circuito de carga electrónica y medida de tensión y corriente podrían utilizarse para medir la energía obtenida en pequeñas instalaciones de generación eólica o fotovoltaica.
- Independencia entre el sistema sensor y el de captación. En el caso de necesitar medir señales de cualquier otro tipo de sensor, no hace falta cambiar el sistema de control ni el SW más allá de modificar las funciones de caracterización y viceversa, en el caso de querer cambiar el sistema de captación de datos, no hace falta modificar o re-fabricar las placas de sensorización.

A continuación se detallará la distribución de las placas que se han realizado, especificando la lógica de agrupación de las placas y el proceso de fabricación de las mismas.

4.2.1. Placas independientes

Las placas independientes de la placa Arduino, son aquellas que cuentan con los sistemas sensores. Todas las placas independientes cuentan con sus propias entradas de alimentación, así como plano de masa, cuentan también con reguladores locales de tensión y conectores tipo MOLEX para las interconexiones entre sí y con las entradas de Arduino. Dichas placas son:

- **Placa de acondicionamiento de señal del caudalímetro:** esta placa está diseñada para captar entradas de 4 a 20mA y sacar una señal proporcional entre 1 y 5V, por lo que sirve para el caudalímetro, o para cualquier tipo de sensor con salida 4-20.
- **Placas de sensores de presión:** De dicho tipo se han fabricado dos placas individuales (una por cada sensor), las cuales realizan el acondicionamiento completo del sensor hasta la entrada analógica del Arduino. Se optó por la realización en dos placas independientes con el fin de poder:
 - Situarlas lo más cerca posible del punto de medida.
 - En caso de que no sea necesario, prescindir de uno de los sensores.

Cabe destacar que ambos sensores cuentan con el mismo circuito de acondicionamiento, por lo que se mantiene la filosofía de reducción de costes asociados a la fabricación, al ser más barato construir dos placas de un mismo tipo que de dos tipos diferentes.

- **Placa de carga variable:** Esta placa, acoplada a la resistencia de potencia de valor 1 ohmio (pueden colocarse hasta tres resistencias en paralelo, para la corriente máxima de 30A), integra los siguientes circuitos dentro de la misma:
 - **Circuito de control de carga variable**
 - **Circuito sensor de corriente**
 - **Circuito sensor de tensión**

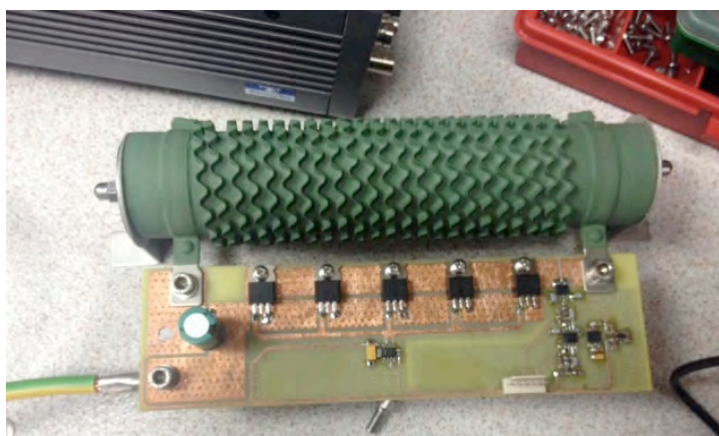


Figura 10: Placa de carga variable

4.2.2. Placas acopladas a la placa Arduino Mega

Las placas acopladas a la placa Arduino Mega dependen específicamente de dicha arquitectura y no son independientes de la misma, dichas placas son:

- **Placa de pantalla LCD:** Dicha placa incorpora el LCD, así como los circuitos de regulación de niveles necesarios para su funcionamiento, y venía de serie con la propia pantalla. Ésta placa cuenta también con unas patillas que la permiten acoplarse directamente a las placas Arduino mediante los conectores de paso 2'54mm con los que éstas cuentan.
- **Placa de datos:** Dicha placa se fabricó con una placa de prototipado rápido de pistas, cuenta a su vez con un sistema de doble hilera de pines de 2'54mm para encajar en la placa Arduino, además de un conector MOLEX situado para poder conectar la botonera, así como alimentaciones e interconexión de la tierra y alimentaciones de todas las placas independientes. Los circuitos realizados sobre dicha placa son:
 - **Circuito de chip RTC:** Dicho circuito se encuentra conectado a las entradas que requiere para la comunicación serie con la placa Arduino, así como con un porta-pilas para pilas de botón (3'3V) independiente, para que el reloj no pierda los datos de la fecha y la hora cada vez que



es desconectado de la alimentación general del circuito.

- **Circuito de tarjeta SD:** Dicho circuito es el encargado de regular los niveles de entrada a la placa Arduino desde el porta-tarjetas SD comprado al fabricante, así mismo, cuenta con el propio porta tarjetas soldado y acoplado a dicha placa en un punto de fácil extracción de la tarjeta por parte del usuario.
- **Botonera:** Las conexiones de los botones se realizan mediante un conector MOLEX acoplado a la placa de puntos. Dicho conector se utilizará también para cortocircuitar las tierras que sean necesarias en los sensores, así como para facilitar la alimentación externa de la botonera.

4.3. Sistema de Control y Almacenamiento

Integrado por la interfaz de configuración (botonera y pantalla LCD), el reloj de tiempo real (RTC), que permite etiquetar las medidas con la fecha y hora de adquisición y el módulo de almacenamiento de medidas en una tarjeta SD.

4.3.1. Interfaz de configuración

La interfaz de configuración tiene una componente de HW y SW. Respecto al HW cómo se comentó anteriormente, cuenta con una botonera y una pantalla de LCD. A continuación se detallarán los acondicionamientos realizados en cada una de las partes.

4.3.1.1. Botonera

La botonera consta de cinco botones, cuatro de ellos son de configuración normalmente abierto y uno normalmente cerrado (botón de cancel/fin de prueba).

Para la captación por parte de la placa Arduino, es necesario detectar un cambio de tensión de 5V a 0V o viceversa, y por lo tanto es necesario además que exista un mínimo flujo de corriente hacia la placa para detectar dicho cambio. Para tal fin se ha hecho una configuración de PULL DOWN, cómo la que se muestra a continuación, que mantiene a 0V las entradas cuando el pulsador correspondiente está abierto:

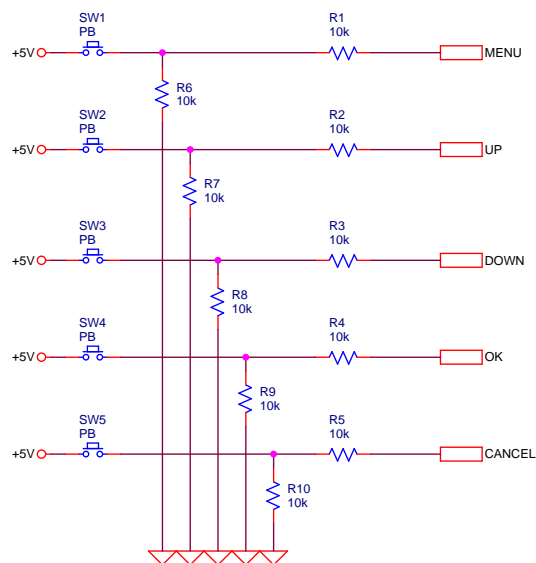


Figura 11: Diseño electrónico de botonera

4.3.1. II. Pantalla LCD

El modelo de pantalla LCD utilizado para éste proyecto es un sistema integrado y diseñado para Arduino, por lo que no tiene un acondicionamiento vía HW específico, siendo necesaria únicamente una configuración vía SW.

4.3.2. Chip RTC

El chip RTC DS 1307 cuenta con dos alimentaciones externas, necesita un cristal para fijar la frecuencia del oscilador de reloj y cuenta con sistema de comunicación por protocolo SPI.

Una de las alimentaciones es de 3'3VDC, necesaria para mantener el reloj en funcionamiento y asegurar por lo tanto que el sistema no se desconfigure (pierda la hora y fecha) entre usos. La otra alimentación es de 5VDC, necesaria para que se pueda realizar comunicación entre el chip y la placa Arduino.

Es necesario que, al igual que antes, existan unas resistencias de PULL UP entre el chip y las entradas y salidas de la Arduino, tal y cómo se detalla en la siguiente figura:

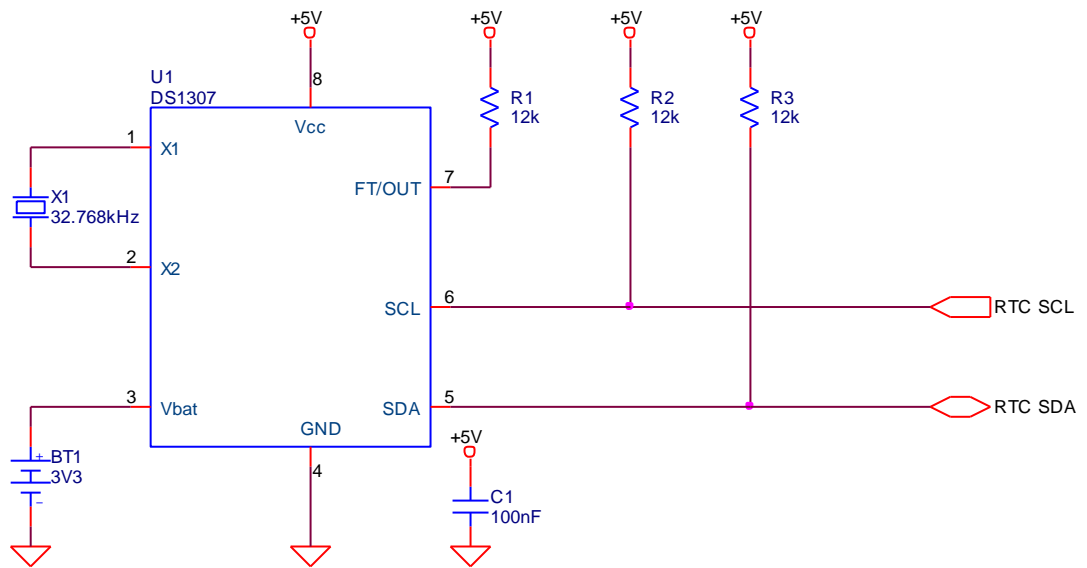


Figura 12: Configuración electrónica RTC

4.4. Tarjeta SD

El circuito de adecuación de la tarjeta SD viene dado por el propio fabricante de la placa, con el fin de adecuar los niveles de tensión a aquellos requeridos por la placa Arduino Mega.

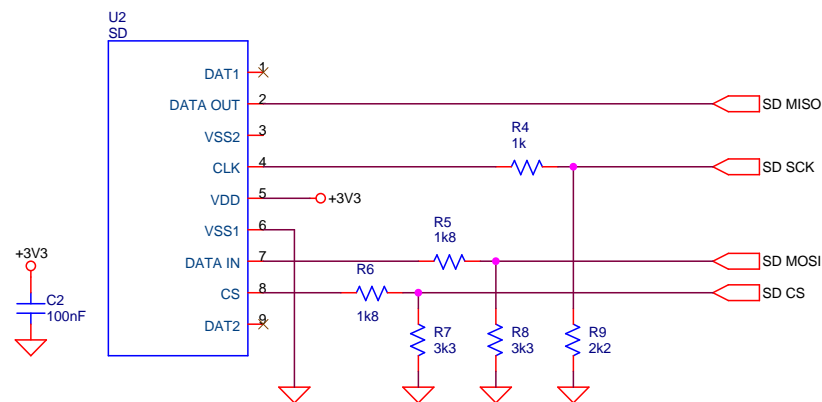


Figura 13: Circuito de tarjeta SD

4.5. Medición de energía mecánica

4.5.1. Sensores de presión

El sensor de presión utilizado (serie 24PC de Honeywell, modelo 24PCG para un rango de $\pm 250\text{psi}$ y 24PCF para $\pm 100\text{psi}$) es de tipo piezoresistivo, incorporando cuatro sensores en un montaje en puente de Wheatstone (configuración en puente completo).

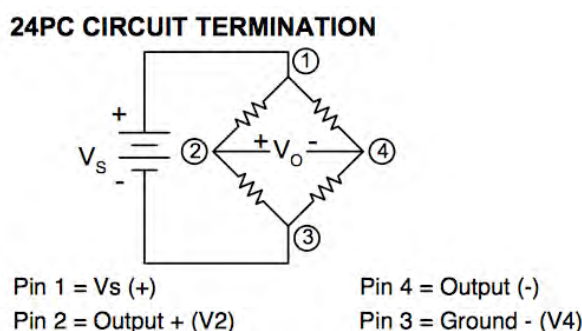


Figura 14: Configuración en puente completo sensores 24PC

El circuito de acondicionamiento se encarga de generar la señal de excitación para el sensor y de amplificar la tensión diferencial a su salida, entregando una tensión adaptada a las entradas analógicas del Arduino (señal referida a tierra con un rango de 0 a 5V como máximo).

Para la medición de la energía mecánica mediante los sensores de presión, es necesario hacer un doble sistema electrónico sobre el sensor: un sistema de acondicionamiento de la señal de excitación para evitar la deriva térmica y el propio circuito de acondicionamiento. Uno de los mayores problemas que pueden encontrarse en las configuraciones de puente de Wheatstone es la desviación de los valores ocasionadas por la deriva térmica de las resistencias que integran el puente. Una de las formas de evitar dicho error es utilizar la configuración de puente completo, pero no es una solución plena, así que adicionalmente se utiliza, siguiendo las recomendaciones del fabricante (Ver: Figura 16: Esquema compensación temperatura serie 24PC) del sensor una excitación en fuente de corriente:

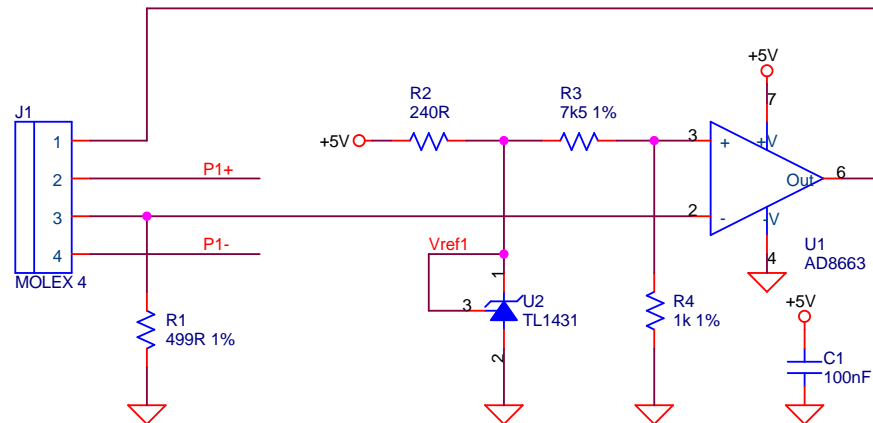


Figura 15: Circuito de compensación de la deriva térmica

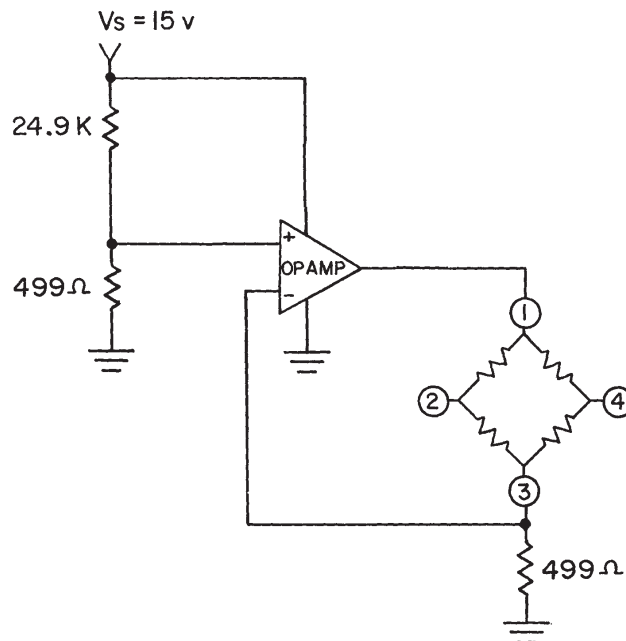


Figura 16: Esquema compensación temperatura serie 24PC

Basado en el esquema de la Figura 16, se diseñó el circuito de la Figura 15, basándose en los siguientes cálculos para cambiar el valor de la resistencia de 24'9K, tal y cómo nos sugiere dicho documento:

$$V^+ = 15 \times \frac{499\Omega}{24'9k\Omega + 499\Omega} = 0'295V$$

Ecuación 1: Tensión en la entrada positiva del amplificador operacional

Siendo V^+ el valor de tensión en la entrada positiva del amplificador operacional. Como nuestra alimentación se ha fijado en un valor de 2'5V mediante una referencia de tensión constante, se procede a calcular el valor equivalente de la resistencia R_3 ,

cambiando el valor de la resistencia inferior R_4 (valor original 499ohm) a 1k con el fin de obtener el mismo valor de tensión a la entrada:

$$\frac{0'295V}{2'5V} = \frac{1k\Omega}{R_3 + 1k\Omega} \Rightarrow R_3 = \frac{1k\Omega \times 2'5}{0'295} - 1k\Omega = 7'47k\Omega \approx 7'5k\Omega$$

Ecuación 2: Cálculo de resistencia R3

Con el fin de fijar el valor de polarización la referencia de tensión TL1431 en 10mA, que es el valor típico dado por el fabricante, el valor de la resistencia R2 debe ser:

$$R_2 = \frac{5V - 2'5V}{10mA} = 250\Omega \Rightarrow R_2 = 240\Omega$$

Ecuación 3: Cálculo de resistencia R2

Por lo que finalmente el valor de corriente de polarización (I_s) que recorre el sensor es de:

$$I_s = \frac{0,295V}{499\Omega} = 0'591mA$$

Ecuación 4: Cálculo de la corriente de polarización del sensor

Dicha corriente es menor que la sugerida por la datasheet del sensor (2mA) porque con sólo 5V de alimentación no podemos meter 2mA al sensor (harían falta como mínimo 10V ya que se optó por utilizar el circuito de compensación de temperatura a través de la alimentación antes citado.

Se ha escogido un amplificador AD8663 en vez del recomendado por la hoja de componente del sensor de presión para éste montaje, debido a las siguientes cuestiones:

- **Alimentación unipolar:** al permitir una alimentación única de 5 a 16V, podemos trabajar con una alimentación de 5V obtenida de la propia batería a través de un regulador lineal.
- **Precisión:** El AD8663 es un A.O. de precisión (bajo V_{io} , baja I_b , alta ganancia, alto CMRR y bajo ruido de entrada a bajas frecuencias), apto para hacer una fuente de corriente de precisión para la alimentación del sensor.
- **Salida rail to rail:** Dicho tipo de salida nos permite recorrer de forma prácticamente completa el rango establecido de salida, es decir, nos da una salida de 0 a 5V.

La salida del puente de Wheastone es de tipo diferencial , por lo que a la salida del sensor (marcadas cómo P1+ y P1- en la Figura 15) se pone un amplificador de



instrumentación, cuya resistencia de ganancia (R_5 en la figura) se escoge para obtener a su salida una tensión de 0 a 5V, la cual se encuentra dentro del rango de entrada del conversor del Arduino, pero permitiendo que en el caso de la máxima desviación contemos, aún en el peor caso de las tolerancias del sensor, con un margen suficiente de seguridad de tensión de entrada al conversor tanto superior como inferiormente. La función general del amplificador diferencial escogido (AD627) es:

$$V_{OUT} = [V_{IN}^+ - V_{IN}^-] \times \left[5 + \frac{200K\Omega}{R_5} \right] + V_{REF} = e_m \times G + V_{REF}$$

Ecuación 5: Función de transferencia AD627

El diseño para el peor caso se basa en que para el mínimo e_m nuestra tensión se encuentre por encima de los 0V y para el máximo e_m por debajo de los 5V, contando con todas las desviaciones posibles del mismo.

En nuestro caso la tensión de referencia (V_{REF}) se ha escogido de 2'5V, ya que es el punto medio en el rango de entrada del arduino y dicha tensión representará el punto de equilibrio del puente (0 PSI). En nuestro caso, para calcular el valor de e_m (excitación de salida entre los puntos de medida del puente) hay que tener en cuenta el valor de la tensión V^+ antes calculada y el valor de la máxima sensibilidad de salida que nos dice el datasheet (294mV a 100 psi y a 2mA como máximo). Adicionalmente, se ha tenido en cuenta el máximo offset de cero para éste tipo de sensores (30mV a 2mA) para realizar el cálculo de la ganancia y del valor de R_5 que la caracteriza, viene determinado de la siguiente forma:

$$e_m = 294mV \times \frac{0'295V / 0'499k\Omega}{2mA} + 30mV \times \frac{0'295V / 0'499k\Omega}{2mA} = 95'5mV$$

$$G = \frac{V_{OUT} - V_{REF}}{e_m} = \frac{5V - 2'5V}{95'5mV} = 26'2$$

$$R_5 = \frac{200k\Omega}{G - 5}; \rightarrow Tomando _ R_5 = 10k\Omega$$

$$Sale \rightarrow G = 25$$

Ecuación 6: Cálculo de ganancia y valor de resistencia R_5

Conociendo la ganancia, la ecuación completa del sistema queda de la siguiente manera:

$$V_{OUT} = [V_{IN}^+ - V_{IN}^-] \times \left[5 + \frac{200K\Omega}{10k\Omega} \right] + V_{REF} = e_m \times 25 + 2'5V(V)$$

Ecuación 7: Función de tensión de salida sensor

Se ha escogido una ganancia de valor 25 para encontrarnos por debajo de la máxima ganancia posible del sistema, calculada anteriormente en la Ecuación 6, con el fin de

que en el peor caso posible, el cual incluye las derivas térmicas conocidas del sensor, no pasemos del límite superior e inferior admitido por nuestro sistema de entradas analógicas. Según la datasheet, la serie 24PC sufre una desviación de la pendiente de $\pm 5\%$ entre 0 y 50°C, y adicionalmente $\pm 2\text{mV}$ como valor de offset a presión 0 dentro de ese rango por lo que ahora calcularemos el valor de e_m con las máximas desviaciones posibles, con el fin de ver que se mantenga dentro del rango de tensiones establecido (0 a 5V).

$$e_m = 294\text{mV} \times \frac{0'295\text{V} / 0'499\text{k}\Omega}{2\text{mA}} \times 1'05 + (30 + 2)\text{mV} \times \frac{0'295\text{V} / 0'499\text{k}\Omega}{2\text{mA}} = 100'71\text{mV}$$

$$V_{OUT} = 100'71\text{mV} \times 25 + 2'5\text{V} = 5'0\text{V}$$

Figura 17: Cálculo salida en peor caso posible

Cómo comprobación, a continuación se va a calcular los tres puntos característicos de la curva de caracterización para ambos sensores (100PSI y 250 PSI) en condiciones nominales:

$$P = 0\text{PSI} \rightarrow e_m = 0\text{V} :$$

$$V_{OUT} = 0\text{V} \times 25 + 2'5\text{V} = 2'5\text{V}$$

$$P = 250\text{PSI} \rightarrow e_m = 62'54\text{mV} :$$

$$V_{OUT} = 62'54\text{mV} \times 25 + 2'5\text{V} = 4'0635\text{V}$$

$$P = -250\text{PSI} \rightarrow e_m = -62'54\text{mV} :$$

$$V_{OUT} = -62'54\text{mV} \times 25 + 2'5\text{V} = 0'9365\text{V}$$

$$P = 100\text{PSI} \rightarrow e_m = 66'375\text{mV} :$$

$$V_{OUT} = 66'375\text{mV} \times 25 + 2'5\text{V} = 4'159\text{V}$$

$$P = -100\text{PSI} \rightarrow e_m = -66'375\text{mV} :$$

$$V_{OUT} = -66'375\text{mV} \times 25 + 2'5\text{V} = 0'841\text{V}$$

Ecuación 8: Comprobación puntos teóricos de ajuste

La salida de la medición de presión es proporcional a la tensión diferencial en base a la Ecuación 7 antes expuesta, y el circuito de acondicionamiento de la señal con el amplificador operacional diferencial queda:

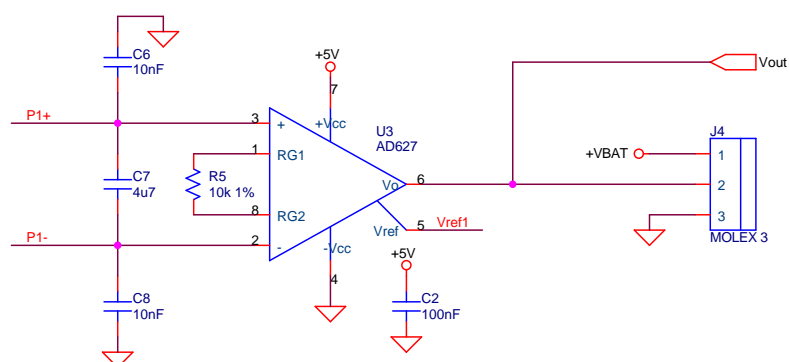


Figura 18: Circuito de acondicionamiento de señal diferencial

La función que ejercen C6, C7 y C8 es la de filtrar posibles interferencias de alta frecuencia que se acoplen a las entradas del amplificador (y que, rectificadas por ellas darían lugar a errores DC), por lo tanto actúan de filtro paso bajo pasivo. C6 y C8 eliminan las interferencias de modo común (frecuencia de corte 3,2kHz) y C7 las de modo diferencial (3,4Hz). Se escoge C7 mucho mayor que C6 y C8 para evitar que sus tolerancias degraden el CMRR del amplificador de instrumentación a altas frecuencias.

Se ha escogido el amplificador de instrumentación AD627, al igual que el amplificador operacional AD8663, debido a que es de alimentación unipolar y nos asegura compatibilidad con el convertidor incorporado en la placa arduino.

Al ser rail to rail, alimentado entre 0 y 5V permite cubrir al 100% el rango dinámico de entrada del convertidor (ver diseño de peor caso).

Adicionalmente, el amplificador escogido tiene una elevada precisión (bajo V_{io} , baja I_b , alto CMRR y bajo ruido de entrada a bajas frecuencias), lo que lo hace idóneo apto amplificar la señal diferencial a la salida del sensor.

Respecto a los sensores 24PC piezo resistivos con configuración de puente de wheastone, un problema habitual en éste tipo de sensores es la histéresis en el rango de medidas, dicha histéresis en caso de existir, produce un error por indeterminación, ya que tendríamos dos lecturas diferentes para un mismo valor de presión. Para la serie de sensores escogida, este error debería ser del $\pm 0'15\%$ FE como máximo.

Durante el proceso de validación experimental se realizó una prueba con el fin de determinar si el error por histéresis estaba dentro del rango previsto (Ver: Sensores de presión, *pág:* 52).

La salida teórica del bloque de sensor de presión responderá a las siguientes ecuaciones:

$$P_{250PSI} = \frac{V_{out} - 2.5}{0.00627} (PSI)$$

$$P_{100PSI} = \frac{V_{out} - 2.5}{0.01659} (PSI)$$

Ecuación 9: Recta de ajuste de los sensores de presión

4.5.2. Sensor de caudal (Caudalímetro)

El caudalímetro escogido tiene un rango de 0 a 100L/min con salida de 4-20mA proporcional al caudal.

Con el fin de adecuar la señal de salida del sensor se ha creado el circuito expuesto en la Figura 19 . Se ha puesto una resistencia en paralelo a la entrada (R11) para hacer la conversión de corriente a tensión, en paralelo a dicha resistencia se ha situado un condensador de 4.7μF que actuará como filtro de paso bajo, cortando las frecuencias superiores a 10Hz antes de la siguiente etapa, correspondiente a un amplificador operacional en configuración no inversora que nos ayudará a fijar los valores de ganancia requeridos por nuestro sistema.

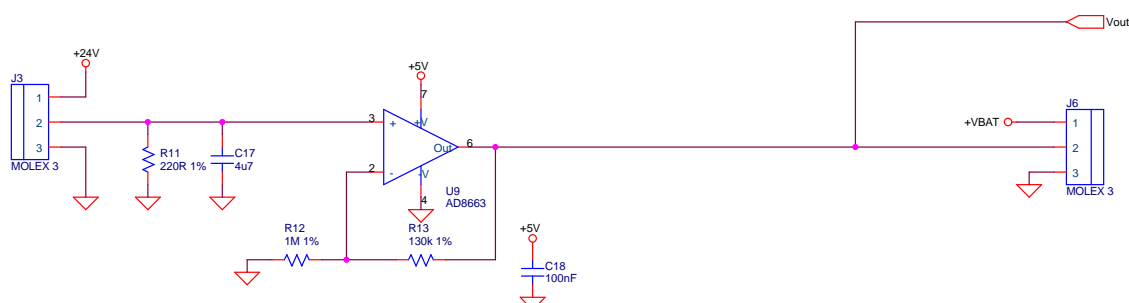


Figura 19 : Circuito de acondicionamiento del caudalímetro

La salida de dicho sensor está planteada para que a un nivel de 0 L/min de caudal (salida del sensor 4mA), la salida sea de 1V y al nivel máximo de caudal admisible por el sensor (100 L/min, salida del sensor 20mA) obtengamos una señal de 5V. Para fijar el valor de la resistencia de 220Ω se tuvo en cuenta el comportamiento general del circuito completo, el cual queda reflejado por la siguiente ecuación:

$$V_{out} = R_{11} \times G \times I_s$$

Ecuación 10: Ecuación general caudalímetro

Por lo que se escogió el valor de la resistencia R11 de modo que, se obtubiese una V_{out} final de 1 a 5V con I_s de 4 a 20mA con una ganancia $G > 1$ (ver ecuación 12) y con valores de resistencia de la serie de fabricación E24, más fáciles de acopiar que las de



la serie E96.

$$V_{out}(V) = 220\Omega \times G \times I_s(mA)$$

Ecuación 11: Ecuación genérica tensión de salida del caudalímetro

La ganancia vendrá determinada por el valor escogido como mínimo para captación del sensor, que en éste caso es de un voltio a una corriente de 4mA, de forma que el valor de ganancia escogido es:

$$G = \frac{V_{out}}{220 \times I_s} = 1'13(V/V)$$

$$G = \left(1 + \frac{R13}{R12}\right)$$

Ecuación 12: Cálculo de la etapa de ganancia

Por lo que finalmente se escogieron las resistencias para la etapa de amplificación mostradas en la Figura 19. El amplificador escogido es el AD8663, por los motivos que se vieron en el apartado 4.5.1. Tras escoger esos valores característicos, la ecuación que caracteriza la salida del sensor en función de la corriente generada por el mismo y por el caudal que admite es:

$$V_{out}(V) = 220\Omega \times 1'13 \times I_s(mA) = 248'6 \times I_s(mA)$$

$$V_{out}(V) = 220\Omega \times 1'13 \times 4mA + Q(L/min) \times \frac{220\Omega \times 1'13 \times (20 - 4)mA}{10L/min} \Rightarrow$$

$$V_{out}(V) = 0'9944 + 0'0398 \times Q(L/min) \approx 1 + 0,04Q(L/min)$$

Ecuación 13: Ecuaciones características tensión de salida en función de Is y Q

Cómo comprobación de los niveles, a continuación se detalla el valor de la tensión de salida en función del rango máximo de caudal calculado:

$$V_{out}(V) @ Q = 0L/min :$$

$$V_{out}(V) = 220\Omega \times 4mA \times 1,13 = 0'9944V \approx 1V$$

$$V_{out}(V) @ Q = 100L/min :$$

$$V_{out}(V) = 220\Omega \times 20mA \times 1,13 = 4'972V \approx 5V$$

Ecuación 14: Comprobación de niveles

La ecuación que describe dicho comportamiento es la siguiente:

$$Q = \frac{V_{out} - 0'9944}{0'03978}(L/min)$$

Ecuación 15: Función de comportamiento sensor de caudal

La alimentación de este sensor, a diferencia de los demás es de 24V por lo que para conseguir estos 24V a partir de la tensión de la batería, se optó por un elevador de tensión regulado de salida aislada, que da una doble salida de 12V, poniendo ambas salidas en serie para obtener los 24V necesarios:

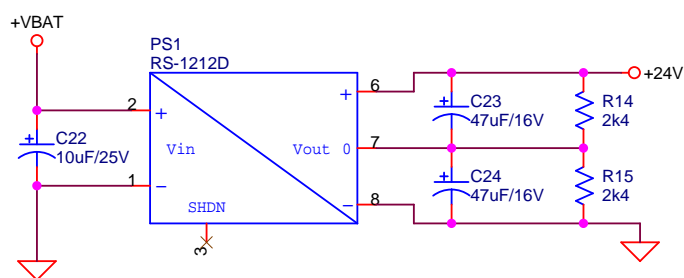


Figura 20: Alimentación de caudalímetro

4.6. Medición energía eléctrica

La medición de la energía eléctrica se hace mediante un bloque sensor, el cual consta de un sensor de corriente, un sensor de tensión y un sistema de control mediante PWM para controlar una carga variable (Ver: Figura 21).

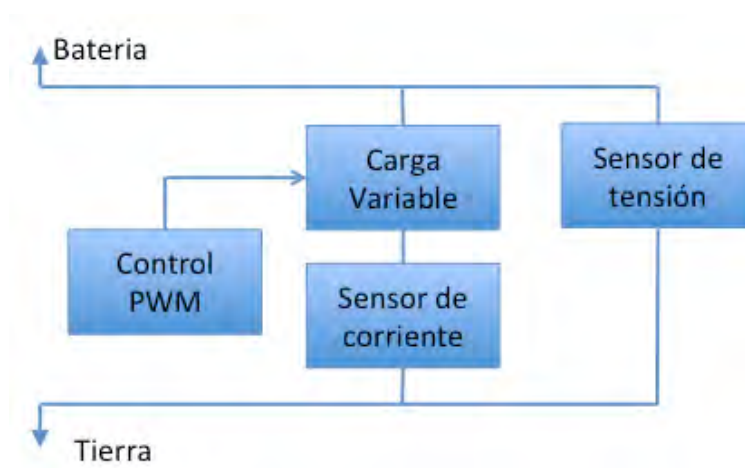


Figura 21: Diagrama de bloques de medición de la energía eléctrica

4.6.1. Sensor de corriente

El sensor escogido es el sensor ACS714 de efecto Hall, con capacidad para medir corrientes de ± 30 A, dando una salida proporcional a la corriente de 0'5V a +4'5V. Se ha escogido este sensor porque, además de su bajo coste, al tener aislamiento galvánico puede ubicarse en cualquier punto del circuito (high side o low side) y existen versiones compatibles pin a pin para corrientes máximas de ± 20 , ± 40 y ± 50 A, lo



que permite modificar fácilmente el sistema para otras corrientes.

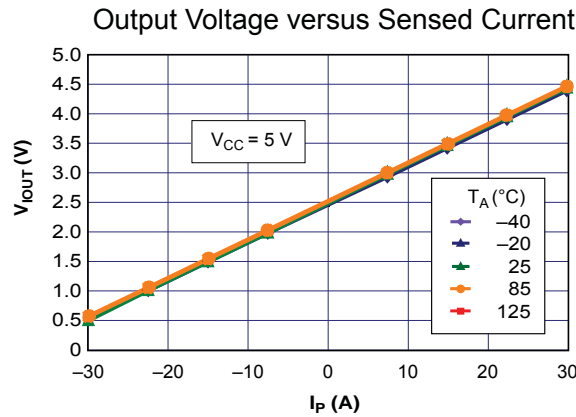


Figura 22: Escala de tensión - corriente ACS714

En el caso concreto de nuestra aplicación, vamos a generar corriente sólo en el intervalo positivo de la corriente del sensor, es decir, generaremos entre 0 y 30A, por lo que sólo nos quedaremos con la mitad del rango de tensión de salida del sensor. Para escalar dicho valor de tensión de salida del sensor (ver esquema de la Figura 23: Sensor de corriente) se ha situado a su salida un amplificador operacional en configuración de filtro paso bajo con una ganancia 2, que duplica el valor de salida del sensor ACS714. Además, se ha puesto una referencia de tensión constante de +4'5V en la entrada negativa del amplificador, con el fin de escalar la salida de la tensión entre 0'5V (0A) y 4'5V (30A), con el fin de aclarar dicho cálculo, a continuación se detallará por pasos el proceso de diseño seguido:

- 1º. Cálculo de la función de transferencia del sensor, en función de la corriente sensada, siendo S la sensibilidad del sensor de efecto Hall:

$$V_{out}^{sens} = S_1 \times I_{sens} + V_0^{sens} \Rightarrow V_{out}^{sens} = 4'5V; I_{sens} = 30A; V_0^{sens} = 2'5V$$

$$S_1 = \frac{V_{out}^{sens} - V_0^{sens}}{I_{sens}} = \frac{(4'5 - 2'5)V}{30A} = 0'0667 V/A$$

$$V_{out}^{sens} (V) = 0'0667 \left(\frac{V}{A} \right) I_{sens} (A) + 2'5(V)$$

Ecuación 16: Cálculo de función de transferencia del sensor de corriente

- 2º. Cálculo de la función de transferencia del amplificador AD8667:

$$\begin{aligned}
 V_{out} &= V_{out}^+ + V_{out}^- \\
 V_+ = 0V &\rightarrow \frac{V_{out}^- - 0V}{100k\Omega} = \frac{0 - V_-}{100k\Omega} \Rightarrow V_{out}^- = -V_- \\
 V_- = 0V &\rightarrow V_{out}^+ = V_+ \frac{100k\Omega + 100k\Omega}{100k\Omega} \Rightarrow V_{out}^+ = 2V_+ \\
 V_{out} &= V_{out}^+ + V_{out}^- = 2V_+ - V_-
 \end{aligned}$$

Ecuación 17: Cálculo de la función de transferencia del amplificador AD8667

3º. Sabiendo que V_+ corresponde con la salida de tensión del sensor y que V_- corresponde a la fuente de tensión estable de 4'5V, obtenemos que la función general del sistema es:

$$\begin{aligned}
 V_{out} &= 2 \times V_+ - V_- = 2 \times V_{out}^{sens} - 4'5V \Rightarrow \\
 V_{out} &= 2 \times (0'0667 I_{sens} + 2'5) - 4'5V \Rightarrow \\
 V_{out} (V) &= 0'1334 \left(\frac{V}{A} \right) I_{sens} (A) + 0'5(V)
 \end{aligned}$$

Ecuación 18: Función de transferencia del sistema

Se ha escogido el amplificador AD8667, debido a que es la versión dual del amplificador AD8663. Como se explicó en el apartado 4.2.1, todas las mediciones de la energía eléctrica generada se realizan sobre una misma placa, por lo que al necesitar dos amplificadores operacionales en el sistema completo (Ver: Figura 23 y Figura 24), por una cuestión de simplicidad en la fabricación de placas y optimización de espacio, se escogió la versión dual del AD8663, por sus múltiples ventajas (Ver ap. 4.5.1).

Adicionalmente, se ha optado por aumentar la capacitancia del condensador C11 del valor recomendado por el fabricante (1nF) al valor actual (100nF), ya que nosotros estamos midiendo una corriente pulsante a la frecuencia de generación de la señal PWM (aproximadamente unos 4kHz), por lo que dicho condensador actúa como integrador de valor medio, filtrando dicha señal y obteniendo, a la salida del sensor, una tensión continua, que representa el valor medio de la corriente por la carga, más un rizado residual procedente de la integración de los pulsos de corriente.

Con la configuración escogida para el amplificador este actúa además como filtro paso bajo activo de segundo orden con frecuencia de corte de 10Hz, que se encargará de acabar de eliminar el rizado de la salida del sensor y también las interferencias, producidas por la conmutación de los transistores y la descarga de la parte inductiva de la resistencia.

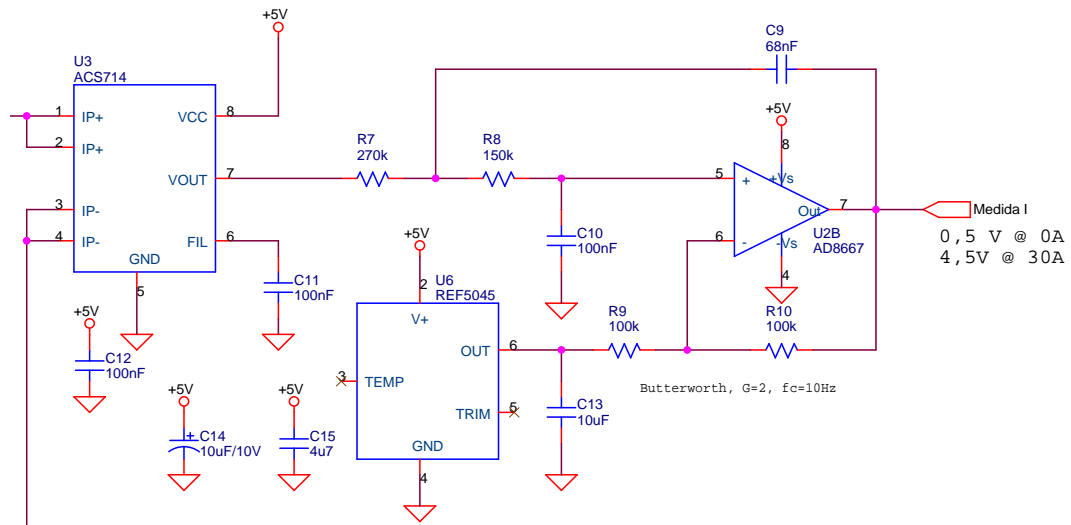


Figura 23: Sensor de corriente

4.6.2. Sensor de tensión

El sensor de tensión es un divisor de tensión mediante resistencias para medir la tensión de salida de la batería escalada a un 25% de su valor. Se ha situado un amplificador operacional con ganancia unitaria y configuración de filtro paso bajo activo, con frecuencia de corte de 10Hz por las mismas razones que en el caso anterior con la salvedad de que, en este caso, no tenemos rizado sino sólo interferencias.

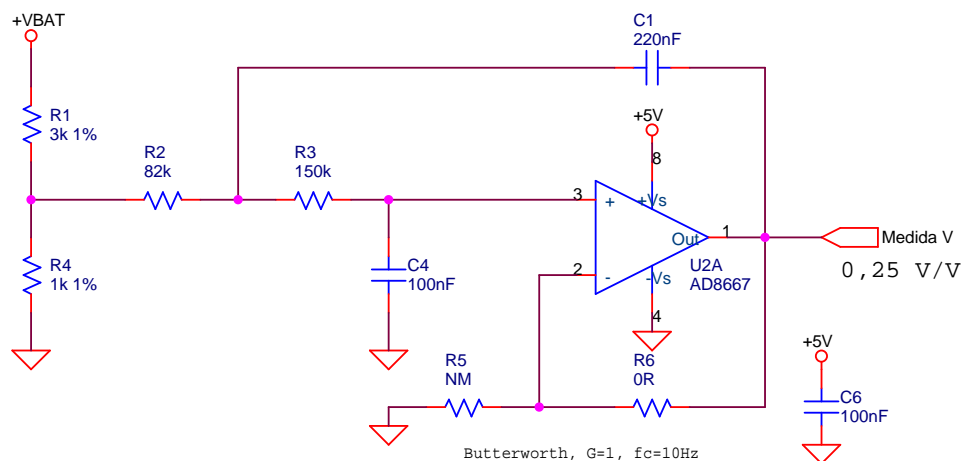


Figura 24: Sensor de tensión

4.6.3. Control de carga variable

El control de carga variable se realiza mediante una señal PWM generada por SW, que sale de la tarjeta Arduino y a través de un driver que eleva su tensión y corriente, se aplica a las puertas de hasta 5 MOSFET conectados en paralelo, que controlan la corriente por la carga. . La finalidad de utilizar hasta cinco transistores en paralelo

(según la corriente a manejar y el modelo de transistor, no sería necesario montarlos todos) es:

- Disminuir el incremento de temperatura causado por la disipación de potencia, evitando el uso de disipadores.
- Reducir a la mínima expresión las pérdidas debidas a la resistencia en conducción ($R_{DS(on)}$ de los transistores).
- En caso de fallo de uno de los transistores, si éste queda abierto, sigue habiendo varios capaces de controlar la corriente.
- Permitir que se puedan utilizar transistores diferentes a los especificados con una mayor $R_{DS(on)}$ y menor $I_{D(MAX)}$ pero quizá más fáciles de acopiar.
- Facilitar el escalado del sistema a corrientes superiores sin necesidad de cambiar de placa.

El MOSFET elegido (AUIRF2807) es específico para aplicaciones de automoción, por lo que es idóneo para trabajar con tensiones bajas y corrientes elevadas como es nuestro caso. De hecho para las corrientes de hasta 30A consideradas para el actual prototipo y teniendo en cuenta una $R_{DS(on)}$ a máxima temperatura de $32m\Omega$, la potencia disipada no supera 1W, por lo que bastaría holgadamente con un único transistor. Se ha diseñado la placa para 5 dispositivos por las razones enunciadas más arriba.

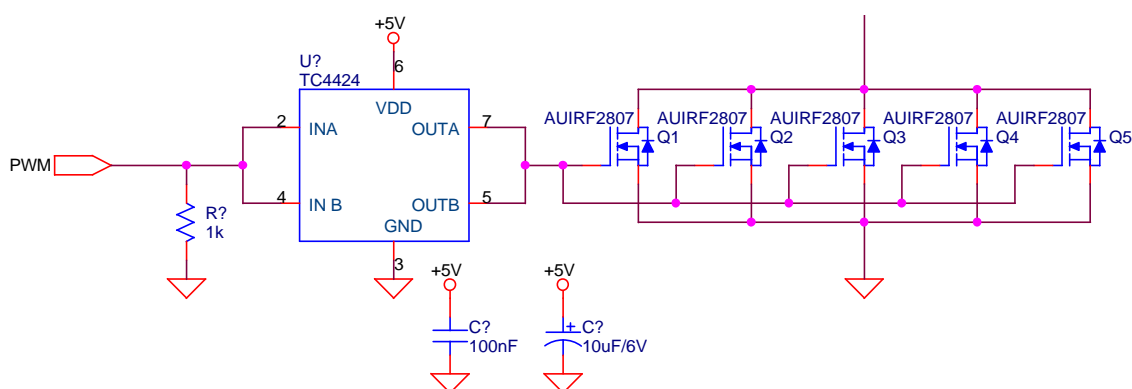


Figura 25: Circuito control PWM



CAP 5. Diseño del Software

El funcionamiento de la programación orientada a la plataforma Arduino se realiza en un lenguaje de C orientado a objetos. La estructura de código siempre consta de al menos dos bloques principales, independientes de la declaración de bibliotecas y variables:

- **Bloque de configuración o “setup”:** El compilador accede a éste bloque una única vez al iniciarse la placa o cargar el código por primera vez, en él se configuran los pines de entrada y salida de la placa, así como otras posibles variables las cuales sea interesante inicializar una única vez.
- **Bloque de programa o “main”:** El programa realiza las instrucciones albergadas dentro de éste bloque de forma secuencial y cíclica. El sistema realiza todas las instrucciones y vuelve a comenzar el código desde la primera línea de “main” hasta el final de forma ininterrumpida y sin necesidad de instrucciones adicionales.

El código se ha estructurado en base a funciones independientes, que forman bloques fácilmente relacionables entre sí dentro del cuerpo del programa. Estas funciones cumplen con cometidos específicos, que se pueden anidar entre si en diferentes capas, con el fin de facilitar la depuración y manejo del código principal.

El código está estructurado de forma que sea fácilmente editable por cualquier persona, incluyendo comentarios aclaratorios, en caso de que sea necesario.

5.1. Bloques de funciones principales

A continuación se explicarán los diferentes bloques de funciones, justificando su necesidad en el bloque principal de código y su funcionalidad.

5.1.1. Bloque de captación de botones

El bloque de código que se encarga de la gestión de captar la señal de pulsado de los botones se encuadra dentro de una función independiente con el fin de poder realizar una navegación correcta por los menús. El funcionamiento de dicho bloque es sencillo: una vez se detecta un flanco de subida en el pin asignado a un botón, el sistema devuelve una codificación numérica de 0 a 4 que facilitará el posterior manejo de la información, en el caso específico del botón “Cancel”, la activación es cuando se detecta un nivel bajo, ya que funciona con una configuración de “siempre cerrado”. En el caso de no encontrar ninguna correspondencia o entrada, devuelve el valor numérico “5”, con el fin de evitar errores.

5.1.2. Bloque de menú

El bloque de menú es donde se realiza la configuración de la frecuencia de muestreo. Ésta configuración se ha limitado entre dos valores: un máximo de sesenta muestras por hora (una muestra por minuto) y un mínimo de una muestra por hora. Por defecto, el valor configurado para las pruebas es de sesenta muestras por hora. Al bloque de menú se accede presionando el botón menú, y la configuración permite subir y bajar entre esos valores en unidades, y aceptar o declinar la selección realizada.

5.1.3. Bloque presentación de datos

El bloque de presentación de datos se subdivide en dos funciones diferentes. Una función dedicada a la presentación de datos de forma constante (fecha y hora) y otra dedicada a presentar datos variables una vez ha comenzado la prueba, que muestra lecturas de los sensores con un periodo de refresco de un segundo.

5.1.4. Bloque gestión de tiempo

El bloque de gestión de tiempo se basa en transformar la hora actual a una codificación numérica unívoca, para ello se transforma la hora a segundos, mediante una función concreta para ello. Al transformar la hora a segundos, cuando se produce la inicialización, se codifica la hora:

$$Tiempo = sec + min \times 60 + hora \times 3600$$

Ecuación 19: Transformación codificada de tiempo

De ésta forma se comparará la codificación de la hora actual con la calculada como hora de siguiente muestra, en el caso de superar la hora actual en valor a la hora calculada, se accede al bloque de guardado de datos.

El caso límite se produce al pasar de las 23:59:59 (valor codificado: 86399) a las 00:00:00 (valor codificado: 0). Para distinguir dichos casos se realiza una comparación sencilla:

```
void GestTime(int ConstTime,tmElements_t tiempo){
    TimeTransform(tiempo);
    if (TimeInSeconds + ConstTime < 86399){
        NextTimeSeconds = TimeInSeconds + ConstTime;
    } else {
        NextTimeSeconds = TimeInSeconds + ConstTime - 86399;
    }
}
```

Figura 26: Código de caso límite de codificación

Cómo se puede apreciar, se compara el próximo valor con el valor codificado de las 23:59:59, en caso de ser menor se guarda normalmente, en caso de ser superior, restamos el exceso para codificar la siguiente hora. (Si por ejemplo, la siguiente hora



de guardado es a partir de las 00:00:05 el valor debía ser superior a 86404, por lo que restamos el valor 86390 y nos da el valor de codificación 5)

5.1.5. Bloque guardado de datos

Para el guardado de datos se ha escrito una función a la cual se le pasan los datos tratados de cada uno de los sensores. Dicha información se encadena en una cadena de caracteres que posteriormente se escribe sobre un fichero que ha sido creado previamente en el bloque de configuración.

5.1.6. Bloque de lectura de entradas analógicas

El bloque de lectura de entradas analógicas realizará las llamadas y evaluación de las entradas analógicas de la placa Arduino, transformando la lectura en una señal de 0 a 5V para todos los casos mediante la transformación:

$$V_{in} = 5 \times \frac{LECTURA}{1024}$$

Ecuación 20: Transformación lecturas analógicas

Dicha transformación se basa en las resoluciones máximas de Arduino: Los 5V antes mencionados como máximo valor y la resolución que es de 10 bits (1024 valores posibles).

5.2. Bloque de programa

El bloque de programa, como se ha mencionado anteriormente, es el encargado de realizar las llamadas al resto de los módulos de forma secuencial y cíclica. La rutina que se encarga de gestionar las llamadas es principalmente el módulo encargado de la detección de los botones pulsados.

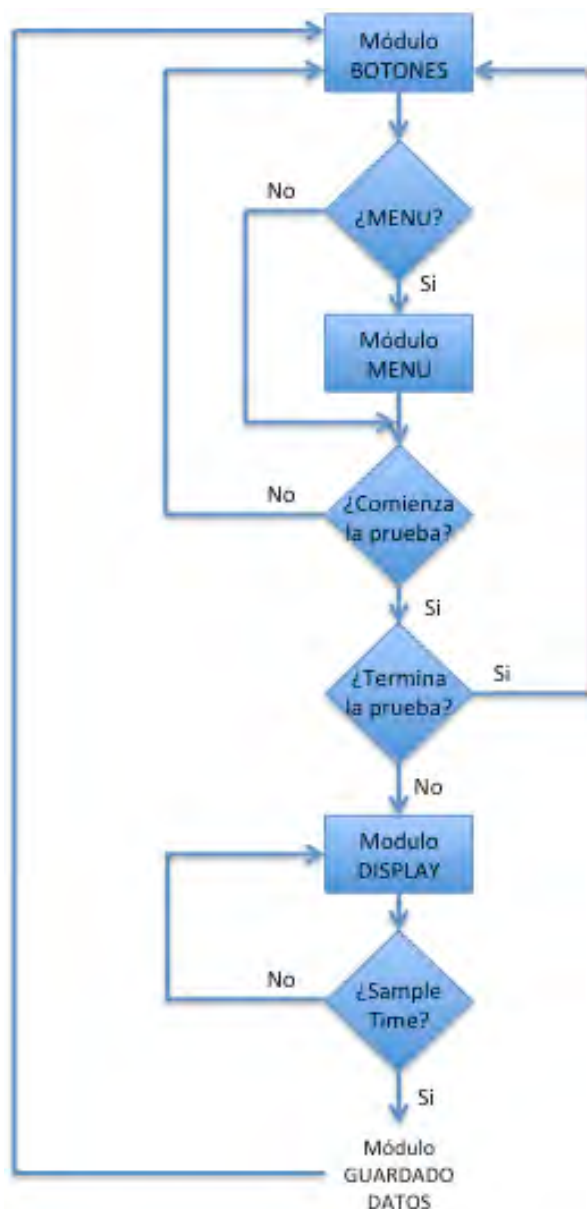


Figura 27: Flujograma programa general

5.3. Ampliaciones del SW

Durante el proceso experimental desarrollado en el CAP 6, en el apartado 6.2, se determinó que el sistema de captación de datos, basado en coger el dato que coincide con la llamada al bloque de guardado de datos, era incorrecto por la posibilidad de coger un dato anómalo, excesos de cambio de pendiente en los intervalos de prueba e inestabilidades en las medidas.

Para evitar dicho problema se optó por almacenar un número limitado de muestras y ordenarlas de menor a mayor, posteriormente se eliminarán los extremos superior e inferior (filtrado de mediana) de esos datos ordenados y se calculará la media de los valores restantes



(filtrado de promedio).

Este doble proceso de filtrado permite atenuar el error debido al ruido aleatorio (al hacer el promedio de N muestras el ruido se reduce por \sqrt{N}) y los picos debidos a medidas espúreas (de esto se encarga el filtrado de mediana, al eliminar los valores anormalmente altos o anormalmente bajos).

Con el fin de realizar dicho proceso, se diseñó un algoritmo de captación media de datos, basado en los siguientes bloques:

5.3.1. Bloque de asimilación de datos

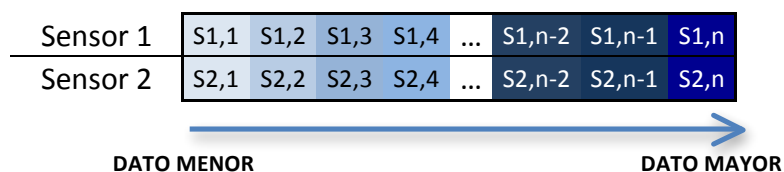
Éste bloque es el encargado de ir asignando datos en una matriz que contiene un máximo de hasta 60 muestras por cada sensor involucrado en el sistema de medida. Ésta función es llamada durante el último minuto antes de guardar los datos en la tarjeta SD, y almacena una vez por segundo las muestras de cada vector, y ordenando los datos en cada iteración mediante el bloque de ordenación. Adicionalmente, actualiza una variable encargada de contar cuantas muestras se han captado para los cálculos posteriores de los datos captados en la matriz. Dicha matriz y la variable de control se resetea una vez guardado el dato de interés.

5.3.2. Bloque de ordenación

El bloque de ordenación forma parte del sistema diseñado para evitar la captación de datos anómalos. Dicho bloque facilitará el funcionamiento general del sistema de captación de datos, puesto que es el encargado de desplazar a los extremos los datos anómalos captados por cada sensor.

El bloque de ordenación es llamado por el bloque de asimilación de datos en cada iteración, y lo que hace es operar hasta dejar los datos de cada sensor dentro de la matriz ordenados de menor a mayor. Para ello, la rutina compara el dato con la última posición introducida, perteneciente a la iteración anterior, en el caso de que la nueva entrada sea menor que la anterior, se mueve una posición y pasa a ser la anterior, dicha operación se repite hasta que el valor se encuentra en su posición correcta de ordenación, teniendo un número menor en la posición anterior y uno mayor en la siguiente. Al realizarse dicho proceso una vez por iteración, no es necesario hacer demasiados cambios, por lo que no resta mucha potencia de computación.

Figura 28: Matriz almacenamiento de datos (ejemplo dos sensores, n muestras)



5.3.3. Bloque de media

El bloque de media es el encargado de eliminar los datos extremos de los datos almacenados y previamente ordenados de cada sensor y posteriormente calcular la media de los datos restantes. Dicho bloque es llamado dentro del bloque de guardado, antes de guardar los datos dentro de la tarjeta, con el fin de realizar los cálculos necesarios antes del guardado.

El sistema seguido para realizar los cálculos es el de situarse un 10% del número de muestras totales después del comienzo del sensor y un 10% antes de terminar el mismo; esto es, en el caso de que tengamos 60 muestras, se empezaría a calcular la media en el séptimo valor, y se terminaría en el quincuagésimo segundo valor, dejando fuera del cálculo seis valores por extremo.

Una vez situados en dichos extremos, se realiza la suma de los valores restantes de los datos del sensor, y se divide entre dicho número de muestras para obtener la media de la sección significativa de datos, dicha media es la que posteriormente se pasa a los datos de guardado para su escritura en el archivo en la tarjeta de memoria SD.



CAP 6. Proceso experimental

El proceso experimental diseñado contaba con un triple propósito:

- Comprobación del correcto funcionamiento de las placas.
- Calibración de los sensores.
- Comprobar la estabilidad y fiabilidad del SW.

Para dicho proceso, se diseñó un proceso experimental a nivel de sensores y otro proceso a nivel de sistema completo.

6.1. Calibración de Sensores Individuales

Para la calibración de los sensores individuales, se recurrió a un código creado para tal fin. Dicho código se creó como una copia del módulo de adquisición de datos del programa principal, en el cual estaban implementadas las funciones de comportamiento del sensor. El proceso experimental que se siguió contenía dos pasos diferenciados:

1. **Ajuste de cero:** Se situaba en un nivel de referencia correspondiente a una lectura de "0" en la medida física (tensión, corriente, etc...) según el comportamiento teórico y se medía en paralelo mediante un polímetro externo la salida y con la placa Arduino con el código creado para tal fin. Se modificaba el valor correspondiente a la ordenada en el origen, para que al valor correspondiente con "0", extrayésemos el dato deseado.
2. **Ajuste de ganancia:** La ganancia se ajustó mediante dos métodos diferentes:
 - a. **Proporcional a todo el sistema:** Se utiliza un multiplicador externo a la función para aumentar o disminuir el valor en conjunto de la función, puesto que los valores se encuentran por debajo o por encima respectivamente de lo esperado.
 - b. **Modificación de la pendiente:** Se modifica la pendiente, con el fin de ajustar mejor a la recta que conforman los valores reales de medida.

Ambos métodos se ajustaron situando la salida del sensor uno o varios valores conocidos, y corroborados con las ecuaciones teóricas de salida. Dichos valores se captaban mediante la placa Arduino y el software diseñado para tal fin.

A continuación se detallarán los procesos específicos para cada tipo de sensor.

6.1.1. Sensores de presión

Sensor de 250PSI

Para el ajuste el sensor de presión de capacidad máxima de 250PSI se utilizó un material específico facilitado por el Departamento de ingeniería Térmica y de Fluidos: una bomba de presión manual calibrada. Dicho sistema permitía generar una presión que se encontraba desde 0 hasta 300PSI en el sistema, por lo que cubría el total del rango de trabajo holgadamente.



Figura 29: Bomba de presión manual calibrada

Para interconectar el sensor (rosca NPT ¼-28) con la bomba de presión (salida con racor de acople rápido a tubo de 6mm), se fabricó un adaptador de aluminio roscado, con una junta tórica en el lado del racor (a la derecha de la Figura 30). En el lado del sensor, se utilizó cinta de teflón para evitar las fugas de presión.

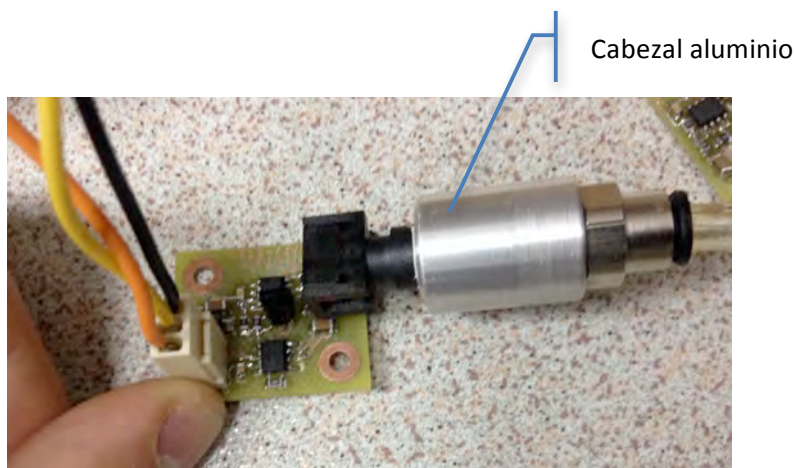


Figura 30: Foto sensor de presión 250 PSI

Previamente al ajuste de la ecuación en el código, se realizó una prueba para calibración los valores empíricos de medida del conjunto sensor-electrónica de acondicionamiento, con el fin de comprobar el correcto funcionamiento del mismo, conforme a los valores teóricos esperados. Dicha prueba consistió en ir subiendo la presión del sistema desde 0PSI a 250PSI en incrementos de 10PSI, y comprobando la salida mediante un polímetro puesto en paralelo a la salida, una vez llegado al máximo valor, dejar que la presión fuese cayendo poco a poco hasta el valor de cero e ir apuntando en los mismos puntos el valor de tensión leído en el polímetro. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 1.

La primera columna de dicha tabla nos indica el valor de presión en el cual se realizó la medida, la segunda columna los valores obtenidos al ir aumentando la presión y en la tercera los obtenidos en la bajada. La cuarta columna nos indica el valor medio entre los dos y la quinta columna nos indica la máxima desviación del punto intermedio.

Cómo se puede apreciar las desviación son en su mayoría inferiores a un mV, exceptuando el caso de 50 PSI en el cual en la rampa de subida se obtuvo un dato claramente erróneo que alteró dicha desviación hasta los 50'2mV, tal y cómo se puede ver en la Figura 31.



Tabla 1: Datos calibración sensor de presión a 250PSI

PSI	Vout Subida (V)	Vout Bajada (V)	Valor medio (V)	Desviación Máxima (V)
0	2,4729	2,4730	2,4730	0,0000
10	2,5317	2,5313	2,5315	0,0002
20	2,5902	2,5910	2,5906	0,0004
30	2,6488	2,6496	2,6492	0,0004
40	2,7073	2,7079	2,7076	0,0003
50	2,6659	2,7663	2,7161	0,0502
60	2,8244	2,8251	2,8248	0,0004
70	2,8830	2,8838	2,8834	0,0004
80	2,9417	2,9421	2,9419	0,0002
90	2,9998	3,0011	3,0005	0,0007
100	3,0585	3,0595	3,0590	0,0005
110	3,1171	3,1177	3,1174	0,0003
120	3,1754	3,1753	3,1754	0,0000
130	3,2336	3,2334	3,2335	0,0001
140	3,2916	3,2910	3,2913	0,0003
150	3,3493	3,3480	3,3487	0,0007
160	3,4078	3,4070	3,4074	0,0004
170	3,4660	3,4650	3,4655	0,0005
180	3,5243	3,5230	3,5237	0,0007
190	3,5820	3,5810	3,5815	0,0005
200	3,6390	3,6380	3,6385	0,0005
210	3,6970	3,6960	3,6965	0,0005
220	3,7550	3,7540	3,7545	0,0005
230	3,8120	3,8120	3,8120	0,0000
240	3,8690	3,8700	3,8695	0,0005
250	3,9270	3,9270	3,9270	0,0000

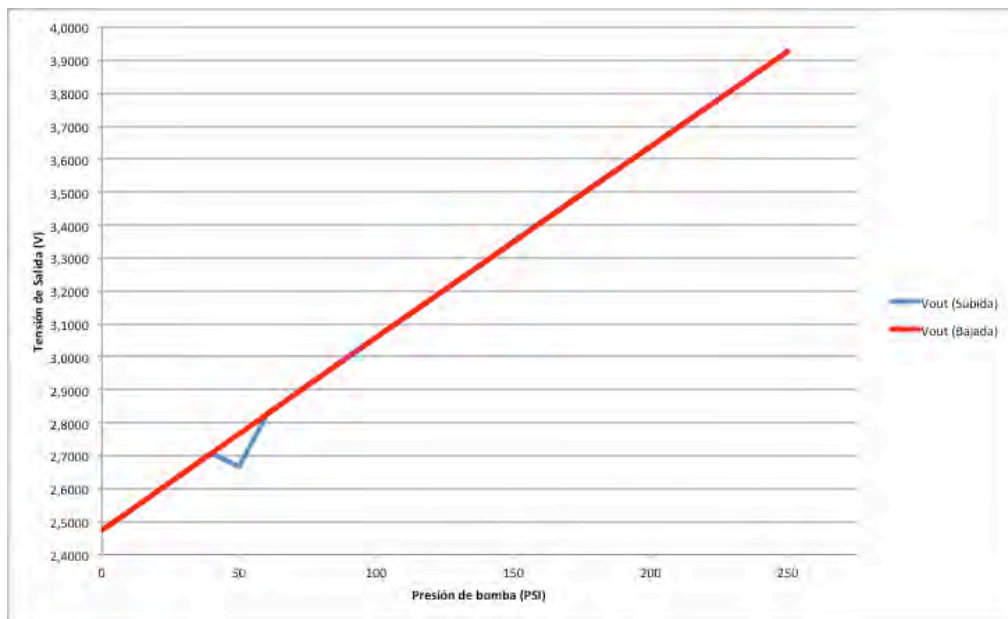


Figura 31: Curva de calibración sensor de presión 250PSI

Cómo se vio en el punto 4.5.1, las salidas teóricas de los sensores de presión eran:

- 2'5V@0PSI
- 4'0635V@250PSI

Durante el proceso experimental se obtuvieron los siguientes datos en los mismos puntos de presión:

- 2'473V@0PSI
- 3'927@250PSI

Dichos valores se encuentran dentro de los límites teóricos asignados a los mismos suponiendo la máxima desviación teórica del sensor, tal y cómo podemos ver en la Ecuación 8.

Adicionalmente, sabiendo que el valor máximo de histéresis es de 0'7mV (obviando el dato claramente erróneo de 50'2mV), se procedió a calcular el porcentaje de histéresis sobre el fondo de escala, para comprobar que se encontraba dentro del límite teórico dado por el fabricante, correspondiente a un 0'15%FE:

$$H_{ys} = \frac{250PSI \times 0'0007V}{(3'927 - 2'473)V} = 0'12PSI \Rightarrow \frac{\pm 0'12PSI}{500PSI} = \pm 0'024\%FE$$

Ecuación 21: Cálculo de error de histéresis en fondo de escala

Cómo se puede ver el error de histéresis es muy inferior al valor teórico dado por el

fabricante en la datasheet, situado en un valor de $\pm 0'15\%$. Cabe destacar que finalmente se descartó la histéresis del sensor, puesto que existen diversos cambios de signo durante el proceso de calibración, por lo que finalmente se consideran errores de medida.

Con los datos obtenidos se procedió a calcular la ecuación característica del sistema, transformando la tensión de salida del sensor en lectura de presión:

$$P_{250PSI} = \frac{V_{out} - 2'473V}{5,82 \times 10^{-3}} (PSI)$$

Ecuación 22: Función calculada para el sensor de presión de 250PSI

Finalmente se realizaron las pruebas de ajuste de la ecuación de calibración del SW en base al proceso antes descrito y se obtuvo la siguiente ecuación, la cual fue cargada sobre la placa Arduino, convirtiendo la tensión leída a la entrada de la placa a presión.

$$P_{250PSI} = \frac{V_{in} - 2'558V}{6,04 \times 10^{-3}} (PSI)$$

Ecuación 23: Función ajustada sensor 250PSI

El que las ecuaciones 22 y 23 no sean iguales se debe al error de conversión del A/D del Arduino.

6.1.2. Sensor de corriente y tensión

El sensor de corriente se calibró conectando la placa conjunto de la carga variable a una fuente de tensión ajustable limitada. Tras hacer el ajuste de cero, se procedió a someter a la carga a una tensión conocida, limitando la corriente de la fuente a su máximo valor (5A). Mediante un generador de señales se generó una señal PWM la cual se ajustó a un ciclo de trabajo en que nos permitiese llegar al límite de corriente de la fuente, una vez alcanzado dicho valor, se fueron ajustando las medidas captadas mediante la placa Arduino hasta ajustar al valor conocido y dado por la fuente, posteriormente se modificó dicho ciclo de trabajo, con el fin de obtener diferentes corrientes como medio de comprobación de la lectura mediante la placa Arduino. En paralelo, se realizó la calibración del sensor de tensión, para ello se tomaron diferentes medidas con un polímetro en paralelo a la fuente y se comprobaron las lecturas recibidas en la placa Arduino. Finalmente se obtuvieron la siguientes funciones de ajuste de la corriente y la tensión por la carga:



$$I_c = 1'08 \times \left[\frac{V_{in} - 0'467}{0'13333} \right] (A)$$

$$V_c = 3'92 V_{in} (V)$$

Ecuación 24: Funciones calibradas de tensión y corriente en carga

6.2. Prueba sistema completo

Para la primera fase del sistema completo, se optó por la realización de una prueba de descarga de batería. Para la realización de dicha prueba, conectaron todas las placas sensoras a sus respectivas alimentaciones y la placa de carga variable se conectó a una batería de 12V y 6Ah, la cual a su vez estaba conectada a una fuente de alimentación de tensión continua regulada, y configurada para limitar la corriente. Dicha fuente simula la potencia entregada por la turbina picohidráulica en diversos regímenes de funcionamiento. Durante el proceso experimental se diferenciarán tres fases diferenciadas:

1ª Fase: Primera Rampa de descarga. Durante esta primera fase, se limita la corriente de salida de la fuente a 2A (equivalente a una potencia de 24W entregada por la central picohidráulica) y se programa la carga PWM para un consumo de unos 7A a 12V. La diferencia de corriente (5A) tiene que entregarla la batería, que se descarga rápidamente hasta una tensión de 9,4V.

Esta fase simularía una situación de alta solicitud de la batería debida a un momento de bajo rendimiento de la turbina.

2ª Fase: Zona estable. En esta fase intermedia, se aumenta el límite de corriente de la fuente hasta 5A (equivalente a una potencia de 50W entregada por la central picohidráulica), ligeramente inferior a la corriente demandada por la carga que, para la tensión de unos 10V que fija en esta fase el nivel de descarga de la batería, es de unos 5,6A.

Esta fase simularía una situación en que la central picohidráulica aporta casi la totalidad (aproximadamente el 90%) de la energía entregada a la carga.

3ª Fase: Segunda rampa de descarga. En esta última fase, se reduce el límite de corriente de la fuente a 3A (equivalente a una potencia de 30W entregada por la central picohidráulica), netamente inferior a la corriente demandada por la carga que, para la tensión de unos 9,5V que fija en esta fase el nivel de descarga de la batería, es de unos 5,2A.

En esta situación la batería, que ya venía bastante descargada de la fase 1, cae rápidamente hasta un nivel de tensión de 8,5V, momento en el que se interrumpe el experimento para evitar alcanzar una profundidad de descarga excesiva en la batería.

Además, al contar sólo con una única bomba de presión se realizó un proceso de descarga con el sensor de capacidad máxima 250PSI, dándole una presión inicial y dejando la válvula de descarga de la bomba abierta al mínimo, para asegurar una descarga lenta de la presión. Los valores del sensor de 100PSI se almacenaron en la memoria, pero no se han plasmado en los resultados, al no tener conexión física con el sensor y ser valores de tipo aleatorio. La prueba se configuró al valor por defecto de almacenamiento en la memoria de la tarjeta SD, es decir, una muestra por minuto, con el fin de obtener suficientes resultados para poder realizar un estudio en una prueba de duración limitada. Para la medición del valor del caudalímetro, se optó por la opción de puentear la entrada con una resistencia, con el fin de mantener un nivel estable que simularía un caudal constante durante todo el proceso experimental, dicha resistencia se calculó para dar un valor a mitad de rango de medida aproximadamente.

$$R = \frac{24V}{(4 + 20) \times 10^{-3} A / 2} - 220\Omega = 2000\Omega - 220\Omega = 1,8k\Omega$$

Ecuación 25: Cálculo resistencia prueba



Figura 32: Detalle sensor caudal con resistencia

El nivel de generación de PWM se ha fijado en un 60% del ciclo de trabajo, con la intención de producir la sollicitación de potencia por parte de la carga variable indicada en los párrafos anteriores. En las pruebas largas reales, con el fin de producir el menor nivel de descarga de la batería posible y mantenernos dentro de la situación simulada en la fase 2, en el que la energía aportada a la carga es la procedente del generador, se iría adaptando el ciclo de trabajo de la señal PWM.



Con el fin de mantener la batería en un régimen seguro de funcionamiento, la prueba terminará en el momento en el que se reduzca un tercio el nivel de la misma, es decir, en el momento en que nos aproximemos a un valor de unos 8V detendremos la prueba, permitiendo que la batería vuelva a cargarse completamente. El montaje realizado queda de la siguiente manera:

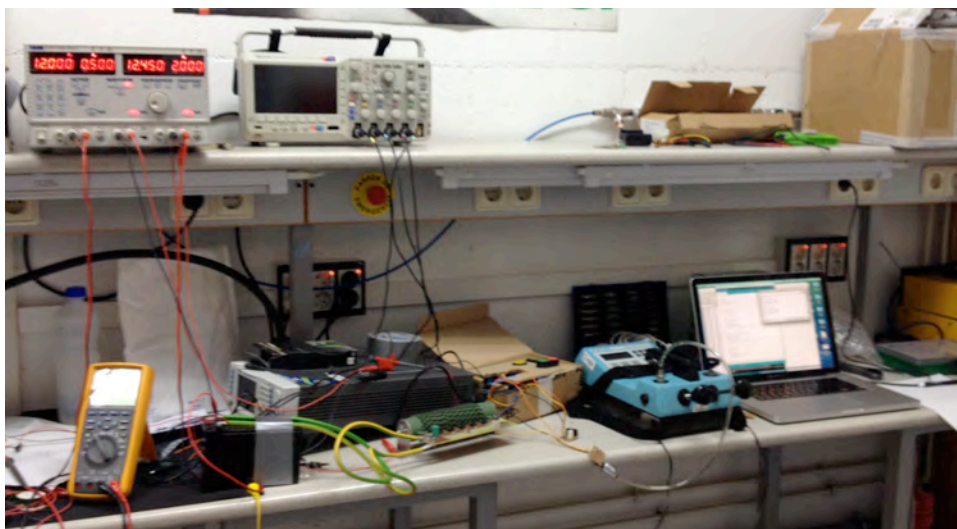


Figura 33: Montaje experimental



Figura 34: Detalle de LCD + Botonera + Bomba de presión

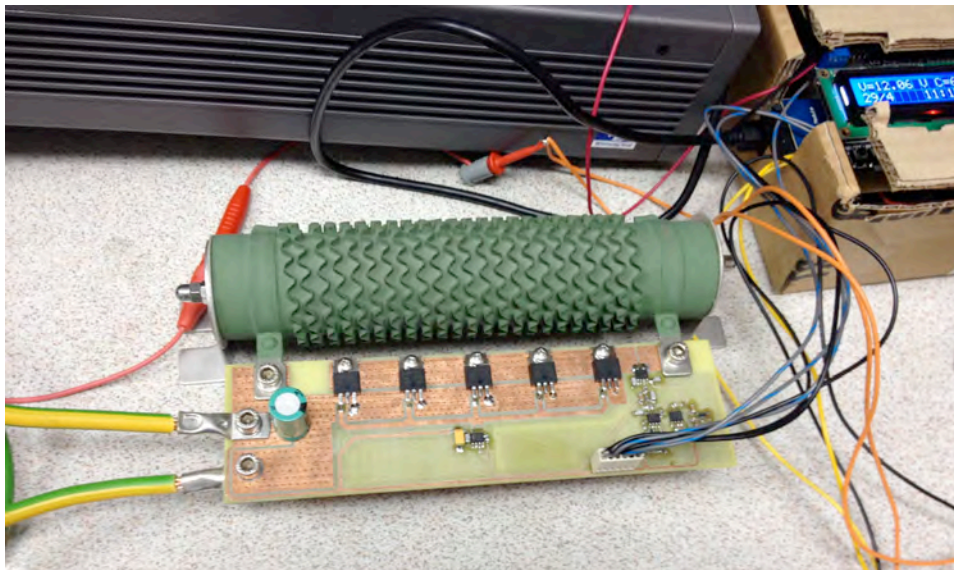


Figura 35: Detalle placa de carga variable con conexionado + LCD

A continuación se muestran los datos extraídos directamente de la memoria SD, los cuales serán analizados posteriormente.



Tabla 2: Datos prueba sin tratar

Fecha	Hora	Tensión (V)	Corriente (A)	Presión 1 (PSI)	Caudal (l/min)
29/04/14	11:07:53	12.2	7.2	220.8	51.3
29/04/14	11:08:57	12.2	7.1	216.8	51.2
29/04/14	11:09:54	12.2	7.0	213.5	50.6
29/04/14	11:10:56	12.2	7.0	209.5	51.3
29/04/14	11:11:57	12.2	7.0	205.4	51.3
29/04/14	11:12:58	12.1	5.9	202.3	51.3
29/04/14	11:14:00	12.1	5.9	199.0	51.3
29/04/14	11:15:02	12.1	5.9	195.7	51.4
29/04/14	11:16:04	12.0	5.9	192.3	51.4
29/04/14	11:17:05	12.0	5.8	189.3	51.4
29/04/14	11:18:06	12.0	5.8	186.8	51.5
29/04/14	11:19:08	11.9	5.7	183.6	51.3
29/04/14	11:20:10	11.9	5.7	180.4	51.4
29/04/14	11:21:12	11.9	5.7	178.0	51.3
29/04/14	11:22:13	11.9	5.7	155.9	51.1
29/04/14	11:23:14	11.8	5.6	174.1	51.3
29/04/14	11:24:16	11.8	5.6	153.1	51.3
29/04/14	11:25:18	11.7	5.8	152.1	50.4
29/04/14	11:26:20	11.6	5.5	87.4	51.3
29/04/14	11:27:21	11.5	5.5	134.2	51.3
29/04/14	11:28:22	11.4	5.3	161.8	51.3
29/04/14	11:29:24	10.0	5.6	159.4	51.3
29/04/14	11:30:26	9.4	5.2	150.9	51.3
29/04/14	11:31:27	10.5	5.8	155.5	51.3
29/04/14	11:32:28	10.2	5.7	153.7	51.4
29/04/14	11:33:30	10.1	5.6	151.5	51.3
29/04/14	11:34:32	10.1	5.6	147.2	51.2
29/04/14	11:35:34	10.0	5.6	148.0	51.3
29/04/14	11:36:35	10.0	5.6	146.4	51.3
29/04/14	11:37:36	10.0	5.6	144.8	51.3
29/04/14	11:38:38	10.1	5.6	142.4	51.2
29/04/14	11:39:40	10.1	5.6	140.8	51.4
29/04/14	11:40:42	10.1	5.6	138.2	51.4
29/04/14	11:41:43	10.1	5.7	137.5	51.4
29/04/14	11:42:44	10.2	5.7	136.7	51.3
29/04/14	11:43:46	10.2	5.7	135.1	51.3
29/04/14	11:44:48	10.1	5.7	133.5	51.3
29/04/14	11:45:50	10.1	5.7	131.9	51.3
29/04/14	11:46:51	10.1	5.7	130.3	51.2
29/04/14	11:47:52	10.1	5.7	130.5	51.3
29/04/14	11:48:54	10.1	5.7	128.6	51.3
29/04/14	11:49:56	10.1	5.7	127.0	51.2
29/04/14	11:50:58	10.1	5.7	123.8	51.1
29/04/14	11:51:59	10.2	5.7	125.4	51.3
29/04/14	11:53:00	10.2	5.7	127.8	51.3
29/04/14	11:54:02	10.2	5.7	122.2	51.2
29/04/14	11:55:04	10.2	5.7	121.4	51.3
29/04/14	11:56:06	10.2	5.7	119.7	51.3
29/04/14	11:57:07	10.2	5.7	119.7	51.3
29/04/14	11:58:08	10.2	5.7	118.1	51.3
29/04/14	11:59:10	10.2	5.7	116.5	51.3
29/04/14	12:00:12	10.2	5.7	114.9	50.8
29/04/14	12:01:14	9.6	5.4	114.1	51.7
29/04/14	12:02:15	9.6	5.4	114.1	51.3
29/04/14	12:03:16	9.5	5.3	109.2	50.9
29/04/14	12:04:18	9.4	5.6	105.2	51.4
29/04/14	12:05:19	9.3	5.2	110.9	51.5
29/04/14	12:06:20	9.1	5.1	108.2	51.3
29/04/14	12:07:22	8.7	4.8	111.7	51.3
29/04/14	12:08:23	8.4	4.7	107.6	51.3
29/04/14	12:09:24	8.1	4.5	106.8	51.3

El tercio de color azul oscuro hace referencia a la primera fase del proceso experimental, el segundo tercio, representado por un color verde, representa la segunda fase, y el último tercio es la tercera y última fase de la prueba. Con el fin de esclarecer los resultados se presentan las siguientes gráficas de los datos:

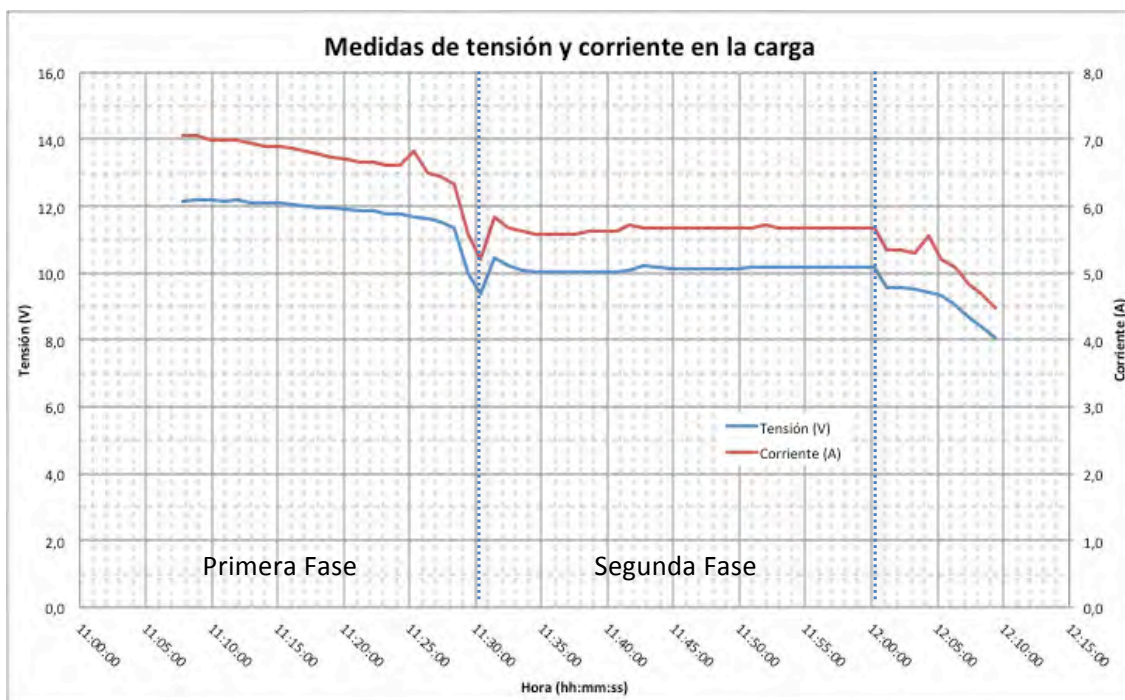


Figura 36: Representación datos tensión y corriente

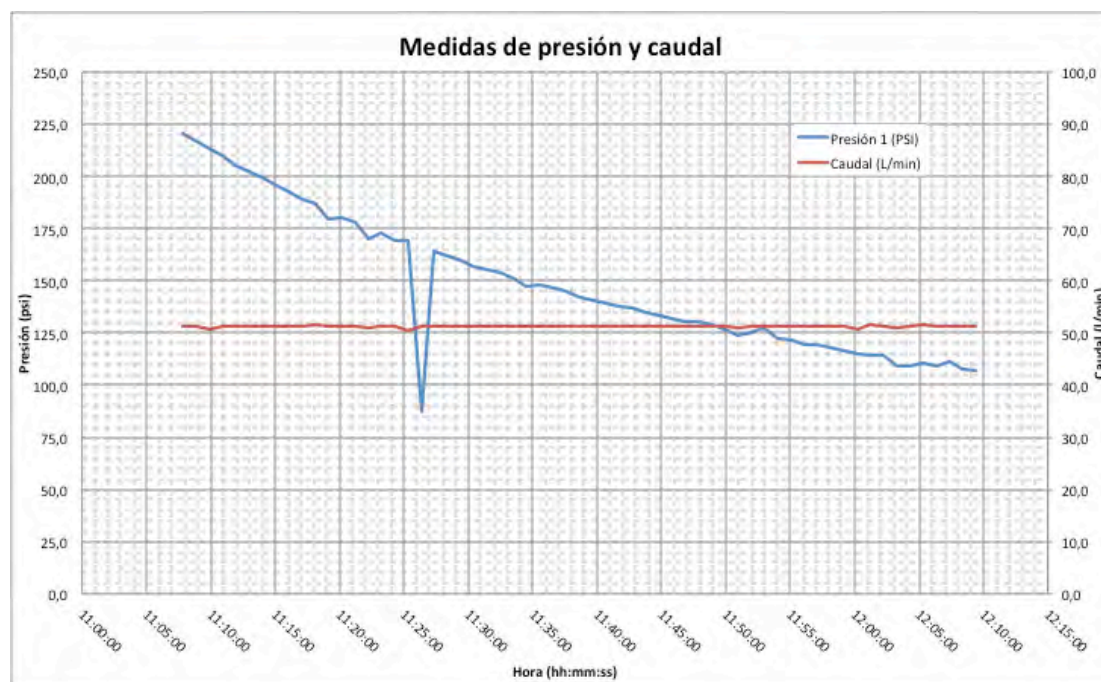


Figura 37: Evolución de la presión y el caudal en prueba

energía procedente de la turbina. Dicho cálculo se corresponde con el balance de energías global del sistema implementado, en el cual tenemos una energía solicitada por un sistema físico, una energía generada mediante una turbina pichidráulica y un sistema auxiliar de energía, que es la batería.

Dicho balance queda representado por la siguiente ecuación:

$$E_{Batería} = E_{Solicitada} - E_{Turbina} (W / h)$$

Ecuación 27: Balance de energía del sistema

Para ver la evolución completa de las energías, a continuación se muestra un gráfico en el cual se representan las tres curvas de energías aportadas por los tres sistemas anteriormente diferenciados.

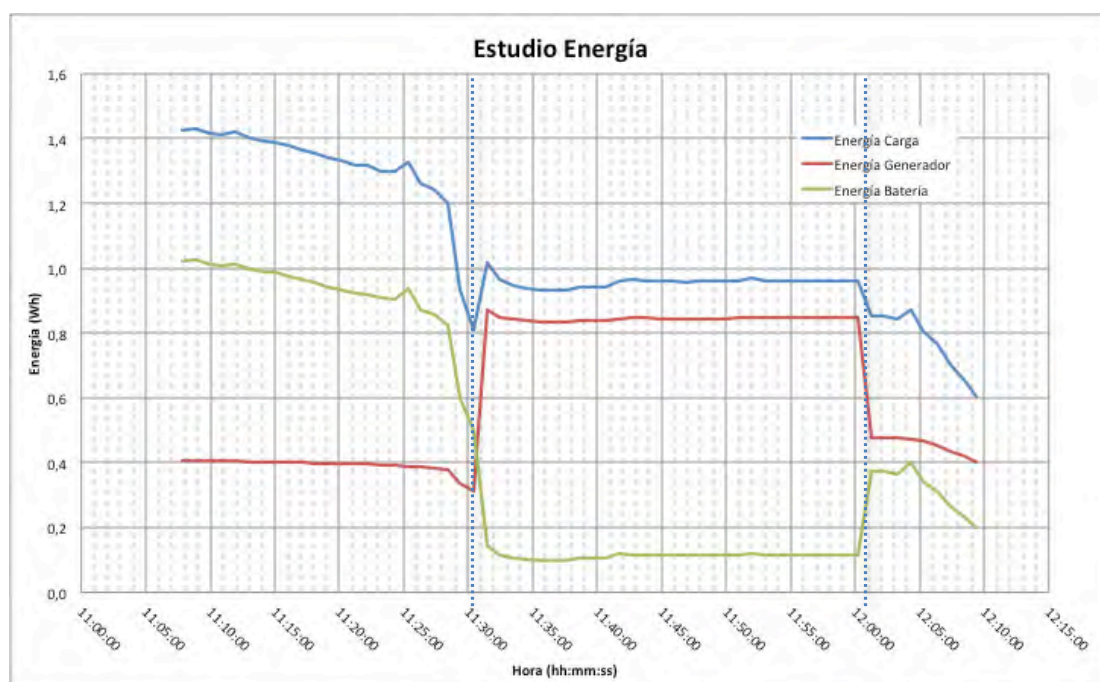


Figura 38: Gráfico evolución de energías

6.3. Análisis de resultados

Durante el proceso experimental, los resultados fueron congruentes con lo esperado, así cómo con las fases experimentales diseñadas. Durante el proceso se pudo detectar una serie de errores en las medidas, los cuales se han producido por un error en el conversor del Arduino, al no realizar una lectura correcta de la entrada. Dicho error es claramente distinguible en la curva de la presión representada en la Figura 37, en torno a las 11:30h, donde se ve un valor muy inferior a la curva de descenso de presión el cual no se corresponde con un valor real de la presión.



Esta misma situación (lecturas individuales que no se corresponden con la tendencia general y son atribuibles a un error puntual de conversión) se da, aunque de forma menos exagerada, en las lecturas de corriente obtenidas alrededor de las 11:25 y de las 12:04 (Ver: Figura 36).

Con el fin de evitar ese tipo de desviaciones, producido por errores de conversión puntuales, se propuso e implementó una mejora del SW de captación (Ver: Ampliaciones del SW, Pág 48).

6.4. Segunda prueba del sistema

Tras implementar la mejora en el SW antes comentada, se realizó un segundo proceso experimental siguiendo una estructura de prueba similar a la explicada en el punto 6.2. La disposición y conexiones del sistema de prueba son las mismas que dicho punto, la principal diferencia entre los dos procesos es que en ésta ocasión se simularon dos únicos estado de prueba: alta sollicitación y baja sollicitación, correspondientes con la primera fase y segunda fase descritas en dicho punto respectivamente. Se pasó de la primera a la segunda fase a las 15:51h, momento en que se introdujo una alteración en la presión externa con el fin de comprobar la absorción por el sistema de las medidas anómalas, y por lo tanto, el buen funcionamiento del nuevo sistema de captación, prosiguiendo después con el proceso de descarga hasta llegar a un nivel próximo a cero de presión.

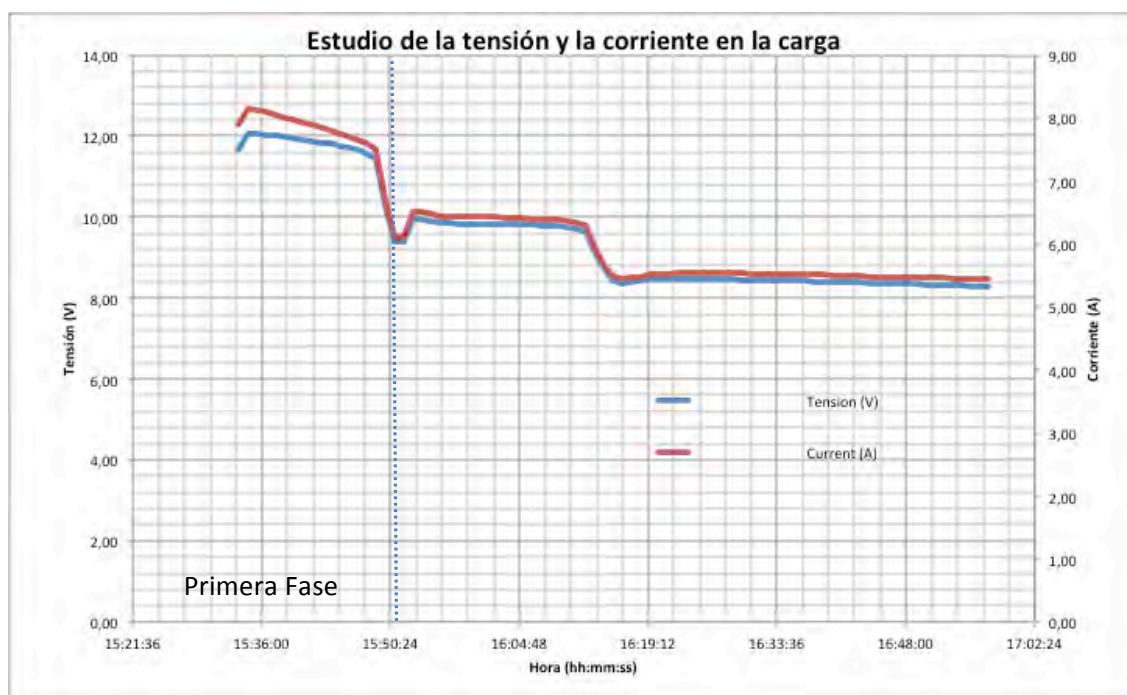


Figura 39: Evolución de la tensión y la corriente (2º Proceso experimental)

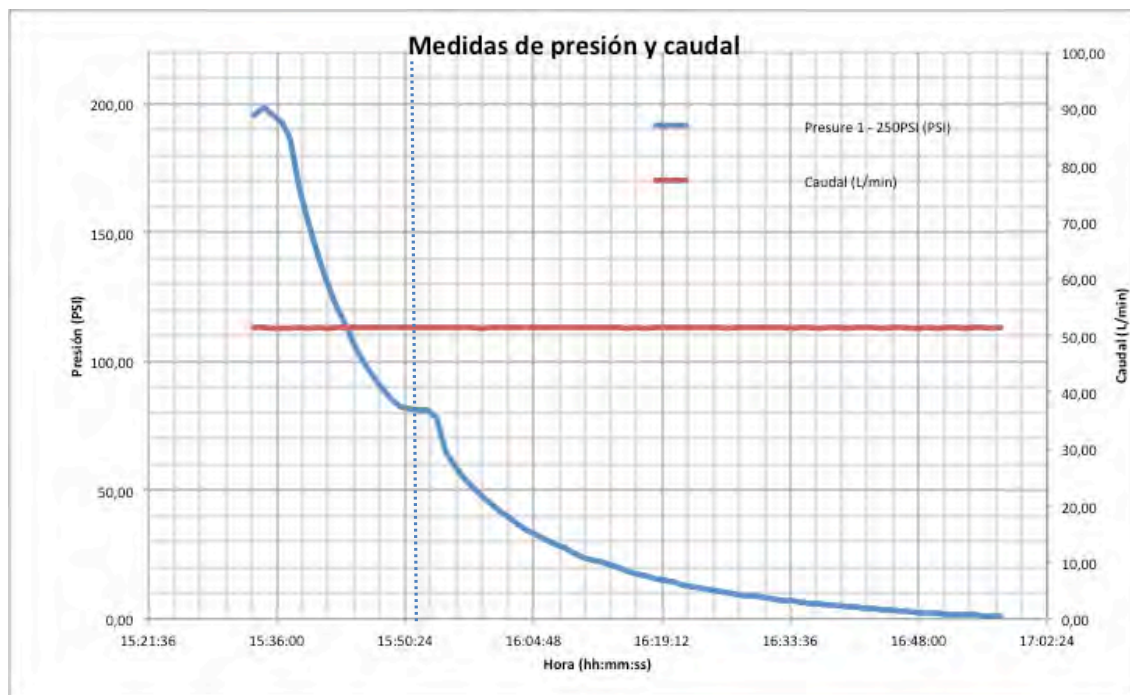


Figura 40: Evolución de la presión y el caudal (2º proceso experimental)

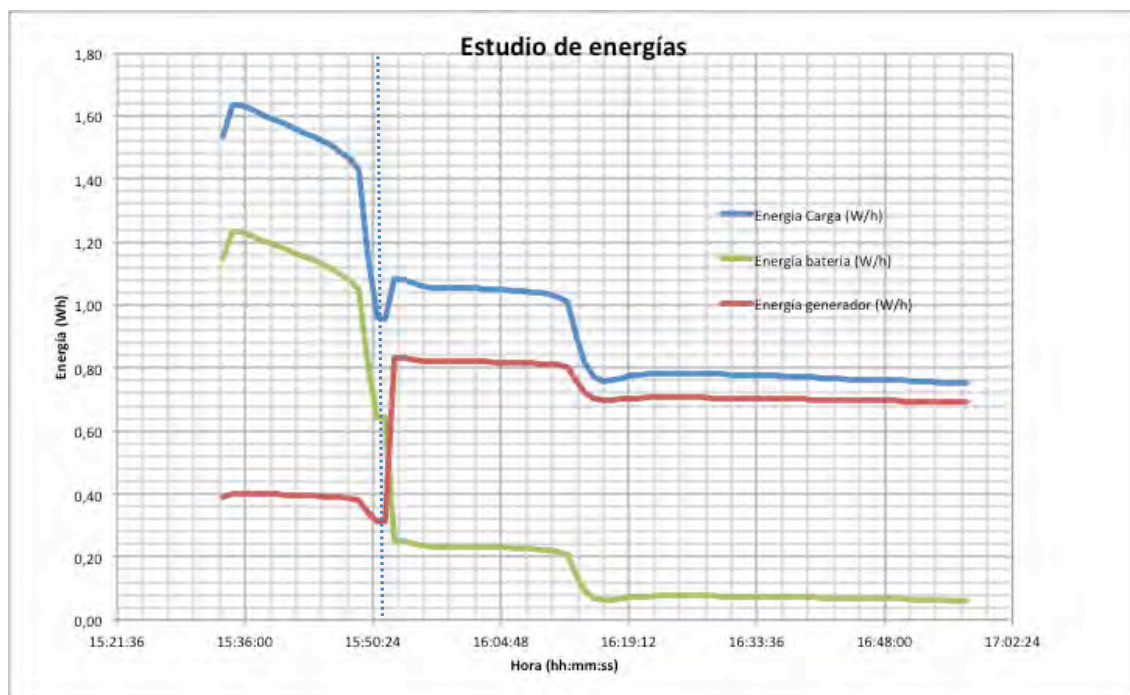


Figura 41: Estudio de energías (2º proceso experimental)



CAP 7. Conclusiones y trabajo futuro

7.1. Conclusiones

Durante el desarrollo de ésta memoria se han ido exponiendo todos los puntos que conforman el sistema y su estructura. Dichos puntos son el resumen de un proceso extenso, en el cual se han ido descartando diversas propuestas por motivos de eficiencia o por alejarse de los objetivos marcados en el origen de éste proyecto. El sistema desarrollado mide eficientemente y con precisión diversas señales extraídas de sensores, acondicionando la señal para abarcar el máximo del rango dinámico en el peor de los casos posibles. Las placas de los sensores son de fácil fabricación y con unos conocimientos básicos de electrónica pueden ser montadas por cualquier persona, por lo que aseguramos que el precio de la fabricación de las mismas se reduzca, así como ampliamos su versatilidad de configuración, al trabajar sobre un diseño modular de las placas. Dichas medidas se recogen sobre un sistema de SW libre, igual de flexible y adaptable a distintas necesidades que la configuración de HW. El sistema desarrollado cuenta además con un sistema de manejo y configuración sencillo y asequible para un usuario sin muchos conocimientos de programación. Dicho SW no tiene porqué ser alterado, y simplemente puede dejarse cargado en la placa Arduino y manejarlo mediante la botonera, por lo que la implantación de dicho sistema de captación, en conjunto con los sensores, son de inmediata integración en el destino: tal y como habíamos fijado en los objetivos del proyecto.

El sistema es una clara mejora del sistema anterior, por capacidad de configuración, control sobre el mismo (comenzar/detener la prueba a voluntad) e información presentada, al contar con un display que nos informa en el momento de las medidas que se están tomando durante la prueba.

Tras la lectura de ésta memoria se puede concluir que se han cumplido todos los objetivos fijados para éste proyecto, de una forma eficiente y práctica.

7.2. Trabajo futuro

Cómo posible mejora al sistema, se propondría mejorar el sistema de referencia utilizado para la transformación de medidas analógicas por parte de la placa Arduino.

La lectura de dichas medidas se hace en base a una entrada denominada como "AREF" en la placa, dicha entrada está conectada al sistema de alimentación de la placa. Nosotros hemos alimentado la placa mediante el mismo USB que utilizábamos para realizar las medidas, por lo que pueden existir pequeñas desviaciones en las medidas causada por la inestabilidad de la tensión a la entrada. Para mejorar dicha alimentación y referencia, se propone usar la

alimentación externa, la cual tiene preferencia en la placa sobre la alimentación USB de forma que se le dote de estabilidad, y adicionalmente, realizar un par de comprobaciones sencillas mediante el SW y una modificación del HW, de la siguiente manera:

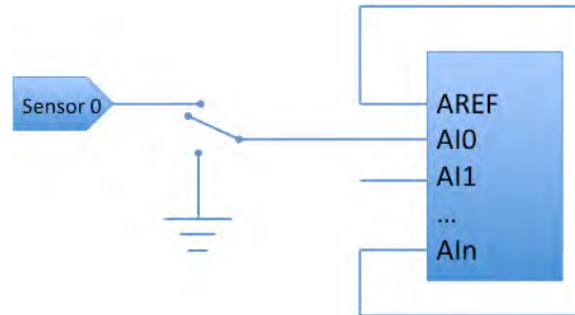


Figura 42: Propuesta de mejora

Tal y cómo vemos en la figura de arriba, hemos realizado una conexión entre la entrada AREF (conectada internamente a la alimentación externa) y una entrada libre de lectura analógica. Dicha lectura nos permitiría conocer cual es nuestro fondo de escala, de forma que al hacer la transformación descrita en la Ecuación 20 no lo haríamos sobre el fondo de escala teórico (1024) sino sobre el fondo de escala que nos da nuestra alimentación (por ejemplo: 1020). Adicionalmente, y con el fin de mejorar aún más la precisión, al comienzo de cada prueba podría tomarse una medida del valor de cero individual para cada sensor mediante el uso de un interruptor gobernado por el microprocesador, de forma que tome una medida de referencia de la tierra para conocer el verdadero nivel de offset frente al teórico (supuestamente 0), por lo que la Ecuación 20 quedaría entonces:

$$V_{in} = 5 \times \frac{(LECTURA - A_{0x})}{AREF}$$

Ecuación 28: Ecuación de transformación mejorada

Siendo A_{0x} el valor de la referencia de 0 del sensor "x" y AREF el fondo de escala obtenido.



CAP 8. Referencias y Bibliografía

8.1. Bibliografía

Alberto, Gregoris Braña. «Ensayo de microturbinas hidráulicas para la generación de energía eléctrica en zonas desabastecidas.». 2012.

Anexos

CAP 1. Manual de manejo del sistema de prueba

1.1. Descripción del sistema de botonera

La disposición escogida de la botonera se puede ver en la siguiente imagen:

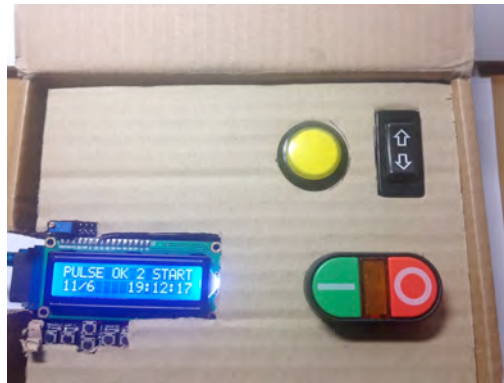


Imagen 1: Botonera en caja de prueba

Los botones corresponden de la siguiente manera:

- **MENÚ:** Botón amarillo circular
- **ARRIBA/ABAJO:** Disposición de las flechas, la referencia es la lectura natural del display
- **OK/ACEPTACIÓN:** Botón verde con un "1" en blanco
- **CANCEL/PARADA:** Botón rojo

El display cuenta con dos líneas, la línea superior muestra información del proceso de prueba en el que nos encontramos (medidas de los sensores) o del estado en el que nos encontramos (MENU o a la espera de comienzo de la prueba). La segunda línea nos da información del sistema, dicha información es unívoca para las pruebas (Fecha y hora o frecuencia de muestreo en el menú).

A continuación se detallarán las posibilidades de manejo del sistema de captación de datos.



1.2. Configuración de las pruebas

La única configuración que se realiza sobre las pruebas es la de la frecuencia de almacenamiento de datos, dicha frecuencia es por defecto de 60 muestras por hora (60 SAM/HOU), pudiendo reducirse dicho valor a 1 muestra por hora como mínimo.

Para acceder a dicho menú de configuración basta con mantener pulsado el botón MENU hasta que aparezca la siguiente pantalla:



Imagen 2: Display del menú

En ella nos mostrará el número actual de muestras por horas seleccionadas, para modificar dicho valor bastará con desplazarnos con los botones de ARRIBA/ABAJO y fijar el valor en la frecuencia deseada, una vez escogida la frecuencia, bastará con mantener pulsado el botón de OK/ACEPTACIÓN hasta que veamos que la prueba ha dado comienzo. En el caso de no desear guardar la frecuencia o cambiarla, bastará con mantener pulsado el botón de CANCEL/PARADA para salir del menú sin guardar los cambios.

1.3. Comienzo y finalización de las pruebas

Para comenzar un proceso de prueba, almacenando los datos en la tarjeta SD tenemos dos posibilidades:

- Continuamos un proceso de prueba detenido
- Comenzamos un nuevo proceso de captación de datos

En el primer caso, la tarjeta SD cuenta con el archivo el que se van a almacenar los datos, con las cabeceras y los datos almacenados de la prueba anterior con sus datos indicativos (Fecha y hora). En el segundo caso, supondremos que se parte de una nueva tarjeta SD, la cual no cuenta con el archivo de almacenamiento de los datos. Los pasos a seguir en cada caso de forma ordenada son:

1.3.1. Continuación proceso de prueba detenido

- 1º. Comprobamos que las conexiones son correctas y no quedan clavijas sueltas
- 2º. Pulsamos y mantenemos pulsado el botón “OK/ACEPTACIÓN” y comprobamos que comienzan a aparecer medidas en el display.

1.3.2. Comienzo de nueva prueba

- 1º. Desconectamos de la alimentación la placa Arduino
- 2º. En caso de haber una tarjeta SD, la extraemos y la sustituimos por la nueva tarjeta SD.
- 3º. Reconectamos la alimentación de la placa Arduino
- 4º. Esperamos a que aparezca en el display el mensaje “SD OK”, en caso de aparecer el mensaje “SD ERROR”, repetir pasos uno a tres cambiando de tarjeta SD.
- 5º. Procedemos cómo se describe en el apartado 1.3.1 de éste ANEXO

Para finalizar una prueba en curso, lo único que hay que hacer es mantener pulsado el botón “CANCEL/STOP” hasta que desaparezca la lectura de los sensores.

1.4. Lectura de los datos guardados

La lectura de los datos se realiza mediante la aplicación Excel. Para poder obtener los datos basta con abrir el programa y en “Archivo/Abrir...” seleccionar el archivo de datos extraído de la tarjeta SD. Los datos se almacenan línea a línea separados por “;” por lo que en las opciones de importación de datos basta con seleccionar dicha celda.

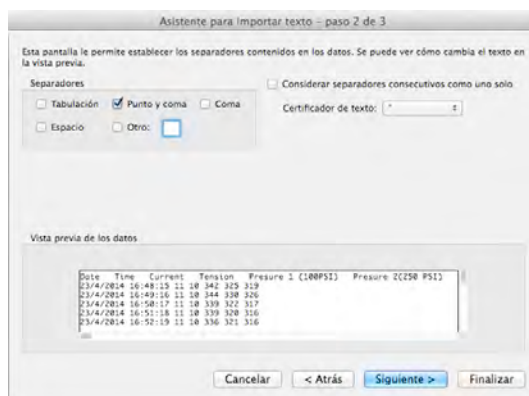


Imagen 3: Configuración importación de datos a Excel



Adicionalmente nos preguntará si la primera columna corresponde a una fecha, lo cual confirmaremos.

Posteriormente es necesario seleccionar todos los valores, y en la opción de menú “Buscar y reemplazar” buscar todos los puntos (“.”) por comas (“,”) para que Excel los reconozca cómo números, y poder tratarlos cómo el usuario considere oportuno.

Planos

Los planos se presentan en formato normalizado en un anexo externo a esta memoria, dichos planos recogen el global de los diseños electrónicos descritos a lo largo de esta memoria.



Pliego de condiciones

Las especificaciones de los componentes son aquellas recogidas en las datasheets de los mismos (que se adjuntan en la versión electrónica del documento) cumpliendo con su funcionamiento dentro de los márgenes establecidos de los peores casos posibles recogidos por las mismas.

El sistema de captación deberá cumplir con las condiciones de configuración y almacenamiento de datos recogidas a lo largo de la memoria.

Year	2010	2011	2012	2013	2014	2015
1. Total	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
2. Government	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0
3. Private	55.0	55.0	55.0	55.0	55.0	55.0
4. Non-profit	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
5. For-profit	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0
6. Total	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
7. Government	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0
8. Private	55.0	55.0	55.0	55.0	55.0	55.0
9. Non-profit	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
10. For-profit	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0
11. Total	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
12. Government	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0
13. Private	55.0	55.0	55.0	55.0	55.0	55.0
14. Non-profit	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
15. For-profit	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0
16. Total	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
17. Government	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0
18. Private	55.0	55.0	55.0	55.0	55.0	55.0
19. Non-profit	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
20. For-profit	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0
21. Total	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
22. Government	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0
23. Private	55.0	55.0	55.0	55.0	55.0	55.0
24. Non-profit	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
25. For-profit	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0
26. Total	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
27. Government	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0
28. Private	55.0	55.0	55.0	55.0	55.0	55.0
29. Non-profit	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
30. For-profit	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0
31. Total	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
32. Government	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0
33. Private	55.0	55.0	55.0	55.0	55.0	55.0
34. Non-profit	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
35. For-profit	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0
36. Total	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
37. Government	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0
38. Private	55.0	55.0	55.0	55.0	55.0	55.0
39. Non-profit	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
40. For-profit	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0
41. Total	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
42. Government	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0
43. Private	55.0	55.0	55.0	55.0	55.0	55.0
44. Non-profit	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
45. For-profit	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0
46. Total	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
47. Government	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0
48. Private	55.0	55.0	55.0	55.0	55.0	55.0
49. Non-profit	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
50. For-profit	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0
51. Total	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

